

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA  
FAKULTA STROJNÍ  
KATEDRA APLIKOVANÉ MECHANIKY

## **Konstrukční návrh předsádky s měnitelnou geometrií pro ultrazvukové snímače**

Engineering Design of Ultrasonic Wedge with  
Adjustable Incidence Angle

Student:

Michal Molčan

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Michal Šofer, Ph.D.

Ostrava 2017

## Zadání bakalářské práce

Student: **Michal Molčan**  
Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 3901R003 Aplikovaná mechanika  
Téma: Konstrukční návrh předsádky s měnitelnou geometrií pro ultrazvukové  
snímače  
Engineering Design of Ultrasonic Wedge with Adjustable Incidence  
Angle  
Jazyk vypracování: čeština

### Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte teoretický úvod v problematice kolmého a šikmého dopadu ultrazvukového svazku na rozhraní dvou prostředí.
2. Vytvořte konstrukční návrh předsádky s měnitelnou geometrií pro ultrazvukový snímač generující podélné vlny. Realizujte výrobu navržené předsádky.
3. Na základě Vámi navržené metodiky realizujte ověření předsádky na umělých vadách.

### Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] OBRAZ, J.: Ultrazvuk v měřící technice, SNTL Praha, 1976, 480 s.
- [2] ROSE, J. L.: Ultrasonic Waves in Solid Media, Cambridge University Press, 2004, 454 p.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Michal Šofer, Ph.D.**

Datum zadání: 09.12.2016

Datum odevzdání: 15.05.2017



doc. Ing. Radim Halama, Ph.D.  
vedoucí katedry




doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty



### **Místopřísežné prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 15.5.2017

  
.....  
podpis studenta

## Prohlašuji, že

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- беру на вѣдомі, же Высoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“ má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3. Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- беру на вѣдомі, же – podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů – že tato bakalářská práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 15.5.2017



.....  
podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce:

Michal Molčan

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Záhlinice 136, 768 24 Hulín



## Anotace bakalářské práce

MOLČAN, M. *Konstrukční návrh předsádky s měnitelnou geometrií pro ultrazvukové snímáče*: bakalářská práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra aplikované mechaniky, 2017, 50 s. Vedoucí práce: Šofer, M.

Bakalářská práce se zabývá návrhem předsádky s měnitelnou geometrií pro ultrazvukovou defektoskopii. Cílem práce bylo navrhnout tvar předsádky, simulovat šíření vln v předsádce a vyrobený prototyp předsádky otestovat a porovnat s komerčně dostupnou předsádkou. V teoretické části jsou popsány základní pojmy ultrazvuku, chování vln na rozhraní, odvození řídicích rovnic šíření podélných a příčných vln a popis ultrazvukové defektoskopie. Obsahem praktické části je návrh tvaru předsádky, simulace a experimentální ověření vlastností prototypu předsádky.

**Klíčová slova:** ultrazvuk, ultrazvuková předsádka, ultrazvuková defektoskopie

## Annotation of bachelor thesis

MOLČAN, M. *Engineering Design of Ultrasonic Wedge with Adjustable Incidence Angle*: Bachelor thesis. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Applied Mechanics, 2017, 50 s. Thesis head: Šofer, M.

Bachelor's thesis deals with the design of variable angle ultrasonic wedge for ultrasonic testing. The main goal of this thesis was to develop the shape of the wedge, realize FEM simulation of wave propagation through the wedge itself and finally to compare the manufactured prototype with a commercially available product. Theoretical part of the thesis contains the theory related to the basic concepts of ultrasound, ultrasonic testing and wave theory, focused on derivation of the governing equations for the longitudinal and shear waves. The practical part contains the topics related to the wedge design, results of FEM simulations and a final experimental verification of proposed prototype.

**Keywords:** ultrasound, ultrasonic wedge, ultrasonic testing

# Obsah

<b>Seznam použitých značek a symbolů</b>	<b>8</b>
<b>Úvod</b>	<b>11</b>
<b>1 Ultrazvuk</b>	<b>12</b>
1.1 Základní pojmy a veličiny . . . . .	12
1.1.1 Kmitání prostředí . . . . .	12
1.1.2 Způsob šíření vln . . . . .	13
1.1.3 Rychlost šíření vln . . . . .	14
1.1.4 Měrná akustická impedance . . . . .	15
1.1.5 Akustický tlak . . . . .	16
1.1.6 Akustická intenzita . . . . .	16
1.1.7 Útlum vln . . . . .	16
1.2 Základní typy vln . . . . .	18
1.2.1 Podélné vlny . . . . .	19
1.2.2 Příčné vlny . . . . .	19
1.2.3 Rayleighovy vlny . . . . .	19
1.2.4 Lambovy (deskové) vlny . . . . .	21
1.3 Odraz a lom vln . . . . .	22
1.3.1 Kolmý dopad na rozhraní . . . . .	22
1.3.2 Šikmý dopad na rozhraní . . . . .	24
1.4 Mechanika kontinua v tuhém prostředí . . . . .	25
1.4.1 Geometricko-deformační vztahy . . . . .	25
1.4.2 Silové a napěťové vztahy . . . . .	26
1.4.3 Pohybové rovnice . . . . .	27
1.4.4 Hookeův zákon . . . . .	28
1.4.5 Odvození řídicí rovnice šíření vln . . . . .	28
1.4.6 Řídicí rovnice šíření podélných a příčných vln . . . . .	29
<b>2 Úvod do ultrazvukové defektoskopie</b>	<b>31</b>
2.1 Měřicí metody . . . . .	31
2.1.1 Průchodová metoda . . . . .	31
2.1.2 Impulzní odrazová metoda . . . . .	32

2.1.3	Rezonanční metoda . . . . .	32
2.2	Měřicí technika . . . . .	33
2.2.1	Piezoelektrické snímače . . . . .	33
2.2.2	Úhlové předsádky . . . . .	34
2.2.3	Vazební prostředky . . . . .	35
<b>3</b>	<b>Návrh plexipředsádky</b>	<b>36</b>
3.1	Požadavky na plexipředsádku . . . . .	36
3.2	Zvažované konstrukce . . . . .	37
3.3	MKP simulace . . . . .	38
3.3.1	COMSOL Multiphysics . . . . .	39
3.3.2	Tvorba geometrie a sítě konečných prvků . . . . .	39
3.3.3	Okrajové podmínky . . . . .	40
3.3.4	Výsledky simulace . . . . .	42
<b>4</b>	<b>Experimentální ověření vyrobené předsádky</b>	<b>44</b>
4.1	Měření parametrů plexipředsádky . . . . .	44
4.2	Vyhodnocení měření . . . . .	46
	<b>Závěr</b>	<b>47</b>
	<b>Seznam použité literatury</b>	<b>49</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>50</b>

## Seznam použitých značek a symbolů

$A$	Amplituda výchylky	[m]
$a$	Okamžitá výchylka	[m]
$c$	Rychlost šíření vlny	[m s <sup>-1</sup> ]
$c_L$	Rychlost podélné vlny	[m s <sup>-1</sup> ]
$c_R$	Rychlost Rayleighovy vlny	[m s <sup>-1</sup> ]
$c_T$	Rychlost příčné vlny	[m s <sup>-1</sup> ]
$\bar{D}$	Střední velikost zrna	[m]
$D, D'$	Součinitel průchodu vlny	[–]
$E$	Modul pružnosti v tahu	[Pa]
$F$	Objemová síla	[N m <sup>-3</sup> ]
$f$	Frekvence	[Hz]
$G$	Modul pružnosti ve smyku	[Pa]
$H$	Poměrná velikost amplitudy	[%]
$I$	Intenzita vlny	[W m <sup>-2</sup> ]
$k_a$	Koeficient ztráty absorpcí	[–]
$k_r$	Koeficient ztráty rozptylem	[–]
$l$	Vzdálenost	[m]
$m$	Poměr akustických vlnových odporů	[–]
$N$	Výkon vlny	[W]
$P$	Amplituda akustického tlaku	[Pa]
$p$	Akustický tlak	[Pa]

$p_{ef}$	Efektivní hodnota akustického tlaku	[Pa]
$r$	Poloměr (vzdálenost) vlnoplochy od zdroje	[m]
$R, R'$	Součinitel odrazu vlny	[–]
$S$	Plocha	[m <sup>2</sup> ]
$s$	Dráha	[m]
$T$	Perioda	[s]
$t$	Čas	[s]
$t_m$	Tloušťka materiálu	[m]
$u$	Složka vektoru pohybu částice ve směru x	[m]
$\mathbf{u}_i$	Vektor pohybu částice	[m]
$v$	Složka vektoru pohybu částice ve směru y	[m]
$V_a$	Amplituda akustické rychlosti	[m s <sup>-1</sup> ]
$v_a$	Akustická rychlost	[m s <sup>-1</sup> ]
$v_{ef}$	Efektivní hodnota akustické rychlosti	[m s <sup>-1</sup> ]
$w$	Složka vektoru pohybu částice ve směru z	[m]
$x$	Souřadnice polohy (dráhy)	[m]
$z$	Měrná akustická impedance (měrný akustický vlnový odpor)	[kg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ]
$\alpha$	Úhel dopadu, odrazu či lomu vlny	[°]
$\alpha_f$	Součinitel útlumu prostředí závislý na frekvenci	[dB m <sup>-1</sup> Hz <sup>-1</sup> ]
$\alpha_g$	Součinitel útlumu prostředí (obecně)	[dB m <sup>-1</sup> ]
$\Delta A$	Poměr amplitud při stejném zesílení	[dB]
$\Delta t$	Velikost časového kroku	[s]
$\Delta x$	Velikost elementu	[m]

$\varepsilon$	Poměrná změna délky	$[-]$
$\boldsymbol{\varepsilon}$	Tenzor přetvoření	$[-]$
$\gamma$	Poměrná změna úhlu	$[-]$
$\lambda$	Vlnová délka	$[\text{m}]$
$\lambda_L$	První Lamého parametr	$[-]$
$\mu_L$	Druhý Lamého parametr	$[-]$
$\nabla$	Diferenciální operátor nabla	
$\nu$	Poissonovo číslo	$[-]$
$\omega$	Kruhová frekvence	$[\text{rad s}^{-1}]$
$\rho$	Hustota prostředí	$[\text{kg m}^{-3}]$
$\sigma$	Normálová složka napětí	$[\text{Pa}]$
$\boldsymbol{\sigma}$	Tenzor napjatosti	$[\text{Pa}]$
$\tau$	Smyková složka napětí	$[\text{Pa}]$
$\nu$	Dilatace	$[-]$
$\varphi$	Fázový úhel	$[\text{rad}]$

# Úvod

U současného strojírenství, kdy jsou na materiál výrobku kladeny vysoké nároky na jeho maximální využití, je nutné zajistit komplexní kontrolu daného strojního celku. Historicky bylo užíváno nedestruktivní testování od druhé světové války, kdy je možné se setkat s aplikací metody ultrazvukové, radiografické, kapilární, magnetické práškové či metody vířivých proudů. V druhé polovině 20. století se dále rozšířilo např. o metody infračervené defektoskopie, mikrovlnné defektoskopie a akustickou emisi.

Ultrazvuková testovací metoda (ultrazvuková defektoskopie) je založena na detekci odrazů ultrazvukové vlny od vad v materiálu. Její výhodou je především citlivost i na drobné vady, schopnost vadu lokalizovat a určit její přibližné rozměry.

Pro generaci ultrazvukových vln vstupujících do materiálu pod určitým úhlem se užívají úhlové předsádky. Při šikmém dopadu podélné vlny na rozhraní nastává lom a odraz, při kterých vznikají i další typy vln (příčná, případně Rayleighova). Využitím znalosti Snellova zákona a kritických úhlů lze v materiálu generovat požadovaný typ vlny, což využívají právě úhlové předsádky.

Komerčně dostupné předsádky mají nejčastěji pevný úhel roviny snímače. Předsádek s měnitelnou geometrií, jako je např. OLYMPUS ABWX-2001, je však na trhu minimum.

Cílem práce bylo navrhnout tvar plexipředsádky s měnitelnou geometrií, který vlny incidentního svazku, odraženého od rozhraní plexisklo/ocel zpětně do plexiskla, směřuje mimo snímač a s využitím vlastností plexiskla tyto vlny dodatečně tlumí. Navržený tvar byl optimalizován simulací s užitím metody konečných prvků. K simulaci byl použit výpočetní software COMSOL. Dle simulace byl vyroben prototyp, na kterém se experimentálně ověřily jeho vlastnosti.



# 1 Ultrazvuk

Pojem ultrazvuk odkazuje na zvukové vlny, které mají frekvenci vyšší než 20 kHz, což je také horní hranice zvuku, které je lidské ucho schopno zaznamenat. Ultrazvuk se uplatňuje prakticky ve všech přírodních vědách a pronikl i do mnoha odvětví techniky. Ultrazvuk se dle účinků rozlišuje na aktivní a pasivní ultrazvuk.

Aktivní ultrazvuk pracuje s velkými intenzitami ultrazvukové vlny a používá se k dosažení fyzikálních nebo chemických účinků<sup>1</sup>.

Pasivní ultrazvuk je důležitým prostředkem v měřicí technice, zvláště pak v defektoskopii (NDT, non-destructive testing), která je předmětem této práce. Kromě defektoskopie se pasivní ultrazvuk užívá například k měření tloušťek, elastických konstant, metalurgické struktury, mechanických napětí, statických tlaků nebo měření výšky hladiny u nádob plněných výbušnými či agresivními látkami [1].

## 1.1 Základní pojmy a veličiny

### 1.1.1 Kmitání prostředí

Ultrazvuk jsou mechanické kmity částic prostředí kolem rovnovážné klidové polohy s frekvencí vyšší než 20 kHz. U aplikací pasivního ultrazvuku<sup>2</sup> lze kmitání popsat vlnovou rovnicí [1]:

$$\frac{\partial^2 a}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 a}{\partial x^2}, \quad (1.1)$$

jejíž partikulární řešení pro rovinnou vlnu je rovnice pro harmonický pohyb:

$$a = A \sin \omega \left( t - \frac{x}{c} \right), \quad [\text{m}] \quad (1.2)$$

---

<sup>1</sup>např. čištění pomocí kavitace, výroba emulzí, ultrazvuková levitace, ...

<sup>2</sup>částice kmitají s malými amplitudami, tudíž  $a \approx \sin a$

kde  $a$  = okamžitá výchylka [m] ,  
 $A$  = amplituda výchylky [m] ,  
 $\omega = 2\pi f$  = kruhová frekvence [rad s<sup>-1</sup>] ,  
 $t$  = čas [s] ,  
 $c$  = rychlost šíření vlny [m s<sup>-1</sup>] ,  
 $x$  = souřadnice polohy (dráhy) [m] ,  
 $\omega(x/c) = \varphi$  = fázový úhel [rad] .

Rychlost kmitání částice kolem rovnovážné polohy  $v_a$  (tzv. akustická rychlost) je dána derivací okamžité výchylky  $a$ :

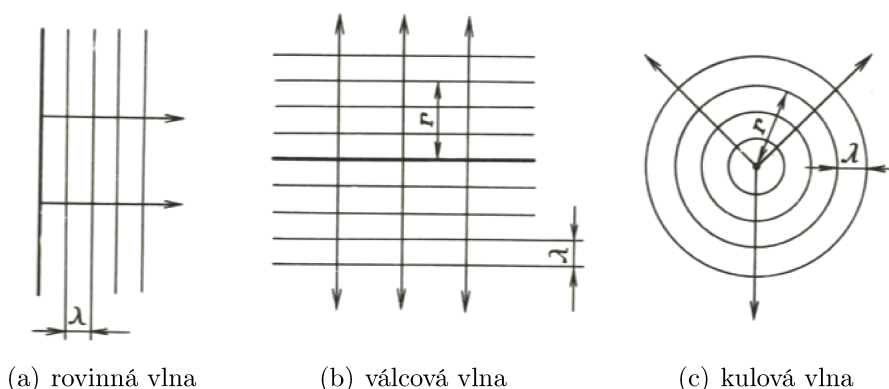
$$v_a = \frac{da}{dt} = \omega A \sin \omega \left( t - \frac{x}{c} \right) . \quad [\text{m s}^{-1}] \quad (1.3)$$

Při šíření zvukové vlny prostředím rychlostí  $c$ , délkou vlny  $\lambda$  a periodou  $T = 1/f$ , kde  $f$  je frekvence, platí vztah:

$$\lambda = cT = \frac{c}{f} . \quad [\text{m}] \quad (1.4)$$

### 1.1.2 Způsob šíření vln

Vlna se v neomezeném prostředí šíří od svého zdroje prostorově. Sousedící částice, které kmitají ve stejné fázi tvoří vlnoplochu (Huygensův princip), podle jehož tvaru označujeme tvary vln (viz obr. 1).



Obrázek 1: Základní typy vlnoploch [1]

U rovinné vlny (obráz. 1a) jsou vybuzené vlnoplochy kolmé na směr šíření. Pro tyto

vlny platí vztah (1.2).

U válcové vlny (obr. 1b) tvoří vlnoplochy souosé válce. Zdrojem těchto vln je přímka nebo válec a popisuje je rovnice [1]:

$$a = \frac{A}{\sqrt{r}} \sin \omega \left( t - \frac{r}{c} \right), \quad [\text{m}] \quad (1.5)$$

kde  $r$  vyjadřuje poloměr vlnoplochy.

Kulové vlny (obr. 1c) vznikají důsledkem působení bodových zdrojů. Vlnoplochy mají tvar soustředných kulových ploch. Platí pro ně vztah:

$$a = \frac{A}{r} \sin \omega \left( t - \frac{r}{c} \right). \quad [\text{m}] \quad (1.6)$$

Výchyvky vln klesají úměrně se vzdáleností (poloměru)  $r$ . Při značně velkém poloměru lze kulové vlny aproximovat rovinnými vlnami.

### 1.1.3 Rychlost šíření vln

Rychlost, kterou je vlna přenášena mezi dvěma body v prostředí, se běžně označuje jako rychlost vlny  $c$ .

Rychlost podélných, příčných a povrchových vln závisí na (Youngově) modulu pružnosti v tahu  $E$ , hustotě materiálu  $\rho$  a Poissonově čísle  $\nu$  [2]. Následující rovnice popisují rychlosti jednotlivých typů vln [1, 2].

Pro rychlost podélné vlny  $c_L$  v neohraničené oblasti platí:

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1 - \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}}. \quad [\text{m s}^{-1}] \quad (1.7)$$

V prostředí, kde jeden nebo dva rozměry  $a$ ,  $b$  (kolmé na směr šíření vlny) jsou ohraničeny – tedy pro desku, kde  $a \gg \lambda$  a  $b \ll \lambda$  platí:

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{1 - \nu^2}}. \quad [\text{m s}^{-1}] \quad (1.8)$$

Pro tyč, kde  $a \ll \lambda$  a  $b \ll \lambda$  platí:

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad [\text{m s}^{-1}] \quad (1.9)$$

Rychlost šíření příčné vlny  $c_T$  v tuhých látkách je dána vztahem:

$$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\nu)}}, \quad [\text{m s}^{-1}] \quad (1.10)$$

kde  $G$  je modul pružnosti ve smyku [Pa]. Rychlost šíření povrchových vln  $c_R$  je popsána rovnicí:

$$c_R = \frac{0,87 + 1,12\nu}{1 + \nu} c_T \approx 0,9 c_T. \quad [\text{m s}^{-1}] \quad (1.11)$$

Rychlost podélných a příčných vln pro vybraná prostředí jsou uvedena v tabulce 1.

#### 1.1.4 Měrná akustická impedance

Měrná akustická impedance  $z$  je obdobně jako elektrická impedance komplexní (mezi akustickým tlakem a rychlostí může být fázový posun). U rovinné nebo kulové vlny v nekonečném prostředí je akustická impedance reálná (nazýváme ji měrným akustickým vlnovým odporem) a lze ji popsat vztahem:

$$z = \rho c, \quad [\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}] \quad (1.12)$$

kde  $\rho$  je hustota prostředí a  $c$  je rychlost šíření vlny. V tabulce 1 jsou uvedeny konstanty vybraných tuhých prostředí.

Tabulka 1: Konstanty vybraných tuhých prostředí při teplotě 20 °C [1]

Materiál	Hustota	Rychlosti šíření zvuku		Akustický vlnový odpor
	$\rho$ [kg m <sup>-3</sup> ]	$c_L$ [m s <sup>-1</sup> ]	$c_T$ [m s <sup>-1</sup> ]	$\rho c_L$ [10 <sup>-3</sup> kg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ]
<i>kovy</i>				
hliník	2700	6320	3230	17064
ocel	7800	5900 až 6000	3260	46300
litina	7200	3500 až 5600	2200 až 3200	25 až 40
měď	8900	4700	2260	42000
<i>nekovy</i>				
sklo	3600	4260	2560	15336
plexisklo	1180	2670	1390	3200

### 1.1.5 Akustický tlak

Akustický tlak  $p$  popisuje amplitudu střídavého napětí, působícího na materiál akustickou vlnou. Akustický tlak je dán vztahem:

$$p = zv_a . \quad [\text{Pa}] \quad (1.13)$$

kde  $v_a$  je akustická rychlost popsána vztahem (1.3) a  $z$  je měrná akustická impedance.

Kombinací rovnice (1.2) a (1.13) vznikne rovnice popisující hodnotu akustického tlaku, šířícího se prostřednictvím vln v daném prostředí:

$$p = \omega A \rho c \cos \omega \left( t - \frac{x}{c} \right) , \quad [\text{Pa}] \quad (1.14)$$

kde  $\omega A \rho c = P$  je amplituda akustického tlaku  $[\text{Pa}]$  a  $\omega A = V$  amplituda akustické rychlosti  $[\text{m s}^{-1}]$ . Pak lze obdobně, jako v elektrotechnice, zavést efektivní hodnoty.

$$p_{ef} = \frac{P}{\sqrt{2}} \quad v_{ef} = \frac{V}{\sqrt{2}} \quad (1.15, 1.16)$$

### 1.1.6 Akustická intenzita

Díky efektivním hodnotám lze definovat intenzitu rovinné nebo kulové vlny vztahem:

$$I = p_{ef} v_{ef} = \frac{1}{2} P V = \frac{1}{2} \frac{P^2}{\rho c} \quad [\text{W m}^{-2}] \quad (1.17)$$

a tedy výkon vlny  $N$  procházející plochou  $S$  je dán jako:

$$N = p_{ef} v_{ef} S . \quad [\text{W}] \quad (1.18)$$

### 1.1.7 Útlum vln

Při průchodu vlny prostředím klesá její energie a tím i její akustický tlak. Příčinou útlumu vlny je:

- a) pohlcování (absorpce), kdy se mechanická energie transformuje na energii tepelnou v důsledku vnitřního tření kmitajících částic,
- b) odraz, lom, ohyb a rozptyl. Vyskytuje se především v nehomogenních a polykrytalických prostředích, kde se označuje jako útlum rozptylem. Příčinou je dopad vln na jednotlivá rozhraní (např. zrna v kovu) v nehomogenní látce [1].

Také platí, že útlum podélných vln je větší než vln příčných. Je to dáno adiabatickými změnami objemu, které nastávají při podélném vlnění. [1]

V jakémkoli materiálu platí, že amplituda vlny při konstantním útlumu klesá se vzrůstající vzdáleností dle vztahu [3]:

$$A = A_0 e^{-\alpha_g l}, \quad [\text{m}] \quad (1.19)$$

kde  $A_0$  je původní amplituda výchylky,  $A$  je amplituda výchylky ve vzdálenosti  $l$  a  $\alpha_g$  je součinitel útlumu prostředí (obecně)  $[\text{dB m}^{-1}]$ .

Součinitel útlumu prostředí  $\alpha_f$ , závislý na frekvenci, je složen ze dvou složek – složky vyjadřující útlum absorpcí a složky vyjadřující útlum rozptylem. Obě tyto složky<sup>3</sup> jsou kromě vlastností materiálu závislé i na frekvenci  $f$  a složka vyjadřující útlum rozptylem závisí i na střední velikosti zrna  $\bar{D}$ . Hodnoty součinitele útlumu pro vybraná prostředí jsou uvedeny v tab. 2. Pro polykrystalické rovnice platí [1, 3]:

$$\text{pro } \lambda > 2\pi\bar{D} \quad \alpha_f \doteq k_a f + k_{r1} f^4 \bar{D}^3 \quad [\text{dB m}^{-1} \text{ Hz}^{-1}] \quad (1.20)$$

$$\text{pro } \lambda \leq 2\pi\bar{D} \quad \alpha_f \doteq k_a f + k_{r2} f^2 \bar{D} \quad [\text{dB m}^{-1} \text{ Hz}^{-1}] \quad (1.21)$$

$$\text{pro } \lambda \ll \bar{D} \quad \alpha_f \doteq k_a f + k_{r3} \bar{D}^{-1} \quad [\text{dB m}^{-1} \text{ Hz}^{-1}] \quad (1.22)$$

kde  $k_a$  je koeficient ztráty absorpcí,  $k_{r1}, k_{r2}, k_{r3}$  jsou koeficienty rozptylu, které obecně závisí na elastických vlastnostech materiálu,  $\lambda$  vlnová délka a  $\bar{D}$  je střední velikost zrna.

Rovnice (1.20) popisuje případ tzv. Rayleighova rozptylu (nastává u jemnozrnné struktury prostředí) a rovnice (1.21) popisuje stochastický rozptyl (nastává u hrubozrnné struktury prostředí). V případě rovnice (1.22) se hranice zrn chovají jako odrazové plochy a rozptylová složka této rovnice není závislá na frekvenci.

---

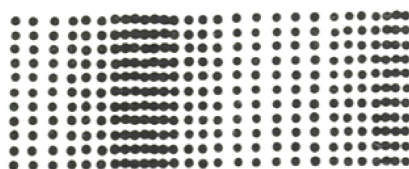
<sup>3</sup>s výjimkou složky vyjadřující rozptyl u rovnice (1.22)

Tabulka 2: Součinitele útlumu podélných vln v některých prostředích při frekvenci 1 MHz [1]

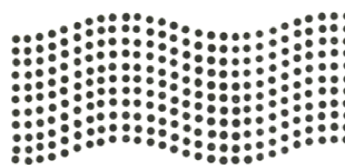
Prostředí	Součinitel útlumu $\alpha$ [dB mm <sup>-1</sup> MHz <sup>-1</sup> ]
hliník	$5 \times 10^{-4}$ až $2 \times 10^{-2}$
ocel	$5 \times 10^{-3}$ až $5 \times 10^{-2}$
měď	$1 \times 10^{-2}$ až $5 \times 10^{-2}$
sklo	$3,2 \times 10^{-3}$
plexisklo	$2,5 \times 10^{-1}$
voda	$2,5 \times 10^{-4}$
vzduch	$1,6 \times 10^{-1}$

## 1.2 Základní typy vln

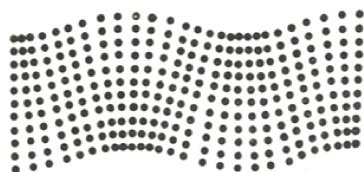
Vlny se dělí dle způsobu kmitání částic prostředí vzhledem ke směru šíření vln. Nejběžnější a nejznámější jsou tzv. objemové vlny – podélné a příčné vlny (obr. 2a resp. 2b). V praxi se rovněž lze setkat s vlnami, šířícími se v prostředích s konečnými rozměry – Lambovy vlny (obr. 2c a 2d) a Rayleighovy vlny (obr. 2e), či vlny šířící se na rozhraní dvou prostředí – Scholteho vlny.



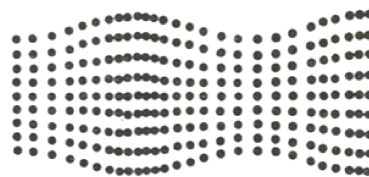
(a) podélné vlny



(b) příčné vlny



(c) Lambovy asymetrické (ohybové) vlny



(d) Lambovy symetrické (dilační) vlny



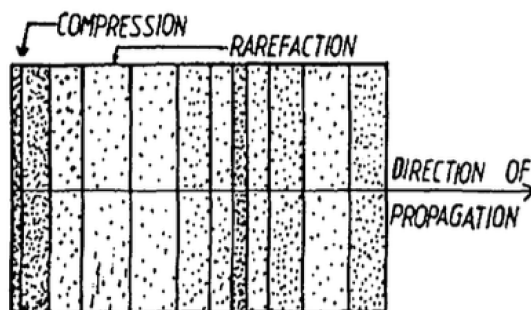
(e) Rayleighovy vlny

Obrázek 2: Typy vln [1]



### 1.2.1 Podélné vlny

U tohoto typu vln se střídají zhuštěné a zředěné oblasti, kde amplituda výchylky pohybujících se částic je rovnoběžná se směrem šíření podélné vlny (viz obr. 3). Díky střídajícímu se zhuštění/zředování dochází v prostředí k objemovým změnám [1].



Obrázek 3: Podélná vlna skládající se ze zhuštěných a zředěných oblastí [2]

Tento typ vlny se vyskytuje v pevných, kapalných i plynných látkách. Jedinou podmínkou pro vznik tohoto typu vlny je, aby rozměry geometrie, ve které se vlna šíří, byly mnohonásobně větší než vlnová délka vlny. Díky snadné detekovatelnosti jsou tyto vlny nejčastěji užívány pro NDT [2].

### 1.2.2 Příčné vlny

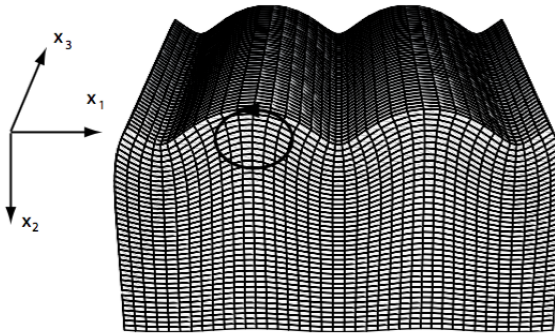
V případě příčných vln kmitají částice ve směru kolmém ke směru šíření vlny (obr. 2b). Pro tento druh kmitání je důležité, aby byla každá částice silně vázána na sousední částice. Toto je důvod, proč lze tyto vlny generovat jen v látkách mající nenulový modul pružnosti ve smyku. Při šíření příčných vln nedochází k objemovým změnám prostředí [1].

### 1.2.3 Rayleighovy vlny

Povrchové vlny byly objeveny lordem Rayleighem koncem 19. století. Vlny se pohybují po volném povrchu, kde jsou částice z jedné strany silně vázány pružnými vazbami a z druhé strany vazebné síly prakticky neexistují<sup>4</sup>. Specifikem Rayleighových vln je jejich výskyt pouze na povrchu materiálu, přičemž zasahují do hloubky přibližně jedné vlnové délky. Rychlost šíření Rayleighových vln je přibližně 90 % rychlosti šíření příčných vln. [2].

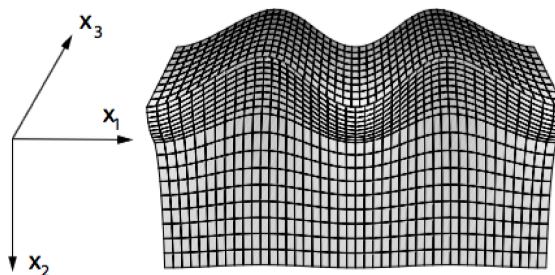
<sup>4</sup>Je-li druhým prostředím plyn nebo velmi tenká vrstva kapaliny (a nad ní plyn), Rayleighovy vlny se vytvoří. Je-li ale druhým prostředím souvislá tlustá vrstva kapaliny, Rayleighovy vlny nevzniknou [2]

Jedná se o zvláštní případ příčných vln a to z toho důvodu, že částice kmitá kolem rovnovážné polohy ve směru skládajícím se ze dvou vektorů. První je kolmý k povrchu (tj. kolmý na směr šíření), má mnohem větší velikost než druhý vektor – vektor s tímto směrem rovnoběžný. Výsledný pohyb částic probíhá po velmi protáhlé elipse (viz obr. 4). Podélná složka totiž s hloubkou ubývá rychleji [1].



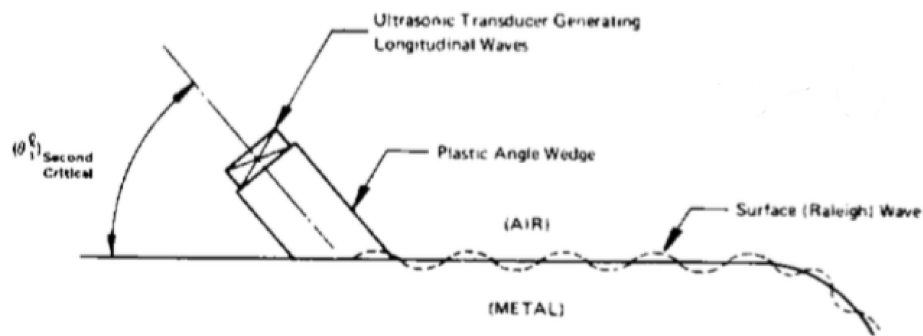
Obrázek 4: Rayleighova vlna [4]

Příbuzným typem povrchových vln jsou **Loveovy vlny** (povrchové seismické vlny, obr. 5), kde částice prostředí kmitají v příčném směru v rovině rovnoběžné s povrchem, kolmo na směr šíření vlny [1]. Loveovy vlny se vyskytují ve velmi tenkých vrstvách tuhého prostředí, které je pevně spojeno s jiným tuhým prostředím. Typickým příkladem této povrchové vlny je zemětřesení.



Obrázek 5: Loveova vlna [4]

Rayleighovy povrchové vlny jsou užitečným nástrojem pro NDT. Jejich útlum je totiž menší v porovnání s podélnými a příčnými vlnami. Výhodou Rayleighových vln je schopnost kopírovat volný povrch, takže je možné je využít ke kontrole značně složitých tvarů (obr. 6). Rayleighovými vlnami je však možné detekovat pouze povrchové trhliny, či trhliny, které jsou v těsné blízkosti pod povrchem [2].

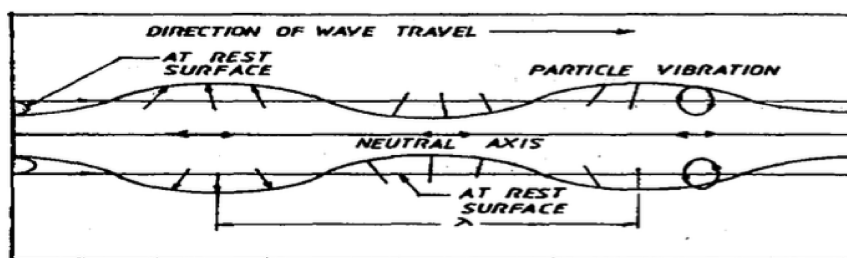


Obrázek 6: Rayleighova vlna šířící se po zakřiveném povrchu [5]

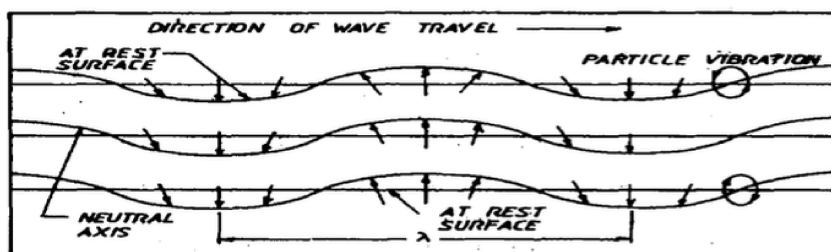
#### 1.2.4 Lambovy (deskové) vlny

Vznikají v prostředí jehož tloušťka je maximálně 3 vlnové délky. Tyto vlny jako první teoreticky popsal Horace Lamb roku 1916 [2]. Na rozdíl od podélných, příčných a Rayleighových vln rychlost Lambovy vlny nezávisí pouze na typu materiálu, ale i na tloušťce materiálu, frekvenci a samotném módu vlny [2].

Dvěma základními módy Lambových vln jsou symetrické (dilatační) a asymetrické (ohybové) vlny. U obou módů se částice na povrchu pohybují po eliptických drahách. Avšak na neutrální ose symetrických Lambových vln kmitají částice ve směru šíření vlny (obr. 7a), zatímco u asymetrických Lambových vln částice neutrální osy kmitají příčně ke směru šíření vlny (obr. 7b).



(a) symetrické Lambovy vlny



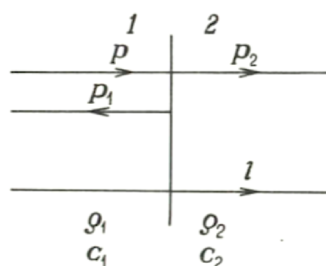
(b) asymetrické Lambovy vlny

Obrázek 7: Módy Lambových vln [2]

## 1.3 Odraz a lom vln

### 1.3.1 Kolmý dopad na rozhraní

Při dopadu vlny na rozhraní část energie vlny projde do druhého prostředí a část se odrazí zpět. Množství energie, které se odrazí nebo je transportováno do druhého prostředí, závisí na rozdílu vlnových odporů jednotlivých prostředí [2].



Obrázek 8: Kolmý dopad vlny na rozhraní 1. a 2. prostředí [1]

Kolmo dopadající vlna s akustickým tlakem  $p$ , na rozhraní 1. a 2. prostředí s různými vlnovými odpory, částečně prochází do 2. prostředí jako vlna s akustickým tlakem  $p_2$  a částečně se odráží zpět do 1. prostředí jako vlna s akustickým tlakem  $p_1$ . Pro rovinnou

vlnu bez útlumu platí [1]:

$$p = P \sin \omega \left( t - \frac{s}{c_1} \right) = \rho_1 c_1 v_a , \quad [\text{Pa}] \quad (1.23)$$

$$p_1 = P_1 \sin \omega \left( t - \frac{s}{c_1} \right) = -\rho_1 c_1 v_{a1} , \quad [\text{Pa}] \quad (1.24)$$

$$p_2 = P_2 \sin \omega \left( t - \frac{s}{c_2} \right) = \rho_2 c_2 v_{a2} , \quad [\text{Pa}] \quad (1.25)$$

kde  $P, P_1, P_2$  = amplituda akustického tlaku dopadající, odražené resp. průchozí vlny [Pa],

$v_a, v_{a1}, v_{a2}$  = akustické rychlosti dopadající, odražené resp. průchozí vlny [ $\text{m s}^{-1}$ ],

$\rho_1 c_1, \rho_2 c_2$  = akustické vlnové odpory 1. resp. 2. prostředí [ $\text{Pa s m}^{-1}$ ],

$s$  = dráha (ve směru dopadající vlny kladná) [m].

Pro popis tohoto jevu byl zaveden součinitel odrazu  $R$  a součinitel průchodu  $D$  [1]:

$$R = \frac{P_1}{P} = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} = \frac{1 - m}{1 + m} \quad [-] \quad (1.26)$$

$$D = \frac{P_2}{P} = \frac{2}{1 + m} , \quad [-] \quad (1.27)$$

kde  $P_1$  = amplituda akustického tlaku odražené vlny [Pa] ,

$P_2$  = amplituda akustického tlaku průchozí vlny [Pa] ,

$P$  = amplituda akustického tlaku dopadající vlny [Pa] ,

$m = \rho_1 c_1 / \rho_2 c_2$  = poměr akustických vlnových odporů [-] .

Obdobou rovnic (1.26) a (1.27) pro akustickou rychlost jsou rovnice [1]:

$$R' = \frac{V_1}{V} = -\frac{1 - m}{1 + m} \quad [-] \quad (1.28)$$

$$D' = \frac{V_2}{V} = -\frac{2m}{1 + m} \quad [-] \quad (1.29)$$

kde  $V_{a1}$  = amplituda akustické rychlosti odražené vlny [ $\text{m s}^{-1}$ ] ,

$V_{a2}$  = amplituda akustické rychlosti průchozí vlny [ $\text{m s}^{-1}$ ] ,

$V_a$  = amplituda akustické rychlosti dopadající vlny [ $\text{m s}^{-1}$ ] .

Součinitele odrazu pro vybraná prostředí jsou uvedeny v tabulce 3. Během odrazu na rozhraní mohou v zásadě nastat dva případy:

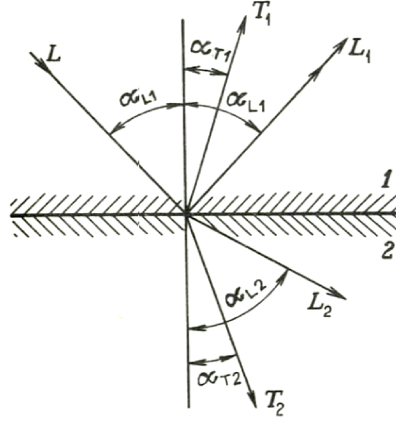
- 1) Je-li akustický odpor 1. prostředí větší (hustší prostředí) než 2. prostředí, a tedy  $m > 1$ , dle rovnice (1.24) je fáze odraženého akustického tlaku opačná než fáze tlaku dopadající vlny. Akustická rychlost odražené vlny má naopak dle rovnice (1.28) tutéž fázi jako akustická rychlost dopadající vlny.
- 2) Přejíždí-li vlna do řidšího prostředí ( $m < 1$ ) je tomu opačně než v případě prvním.

Tabulka 3: Procentuální hodnoty činitelů odrazu  $R$  amplitud akustického tlaku pro různá prostředí [1]

Prostředí	hliník	měď	ocel	sklo	plexisklo
Hliník	0	41	46	8	68
Měď		0	4	50	86
Ocel			0	52	87
Plexisklo				0	7
Sklo					0

### 1.3.2 Šikmý dopad na rozhraní

Jestliže vlny dopadají na rozhraní pod nenulovým normálovým úhlem, odraz a průchod vlny se chová podobně jako u světla (Snellův zákon) s rozdílem, že pokud je alespoň jedno z prostředí schopno přenášet příčné vlny nastává i transformace podélných vln na příčné (obr. 9).



Obrázek 9: Šikmý dopad vlny na rozhraní 1. a 2. prostředí [1].  $L$  značí podélnou vlnu,  $T$  značí příčnou vlnu,  $\alpha$  označuje úhly dopadu, odrazu a lomu. Symboly s indexem 1 značí odraz, s indexem 2 lom.

Pro veličiny na obrázku 9 platí Snellův zákon ve tvaru [1]:

$$\frac{\sin \alpha_{L1}}{c_{L1}} = \frac{\sin \alpha_{T1}}{c_{T1}} = \frac{\sin \alpha_{L2}}{c_{L2}} = \frac{\sin \alpha_{T2}}{c_{T2}}, \quad (1.30)$$

kde  $c_{L1}$ ,  $c_{T1}$  popř.  $c_{L2}$ ,  $c_{T2}$  jsou rychlosti šíření podélné, respektive příčné, vlny v prostředí 1. popř. 2. U šikmého dopadu podélné vlny mohou nastat případy:

- 1) Úhel  $\alpha_{L1}$  nabývá hodnoty, kdy  $\alpha_{L2} = 90^\circ$  vymizí z 2. prostředí podélná vlna  $L_2$ . Tento úhel  $\alpha_{L1}$  se označuje jako *1. kritický úhel*.
- 2) V případě že úhel  $\alpha_{L1}$  nabude hodnoty, kdy úhel  $\alpha_{T2} = 90^\circ$  vymizí i příčná složka  $T_2$ . Tento úhel se nazývá *2. kritický úhel*.
- 3) Při úhlu  $\alpha_{L1}$ , kdy  $\alpha_{T2} > 90^\circ$  nastává *3. kritický úhel*. Při tomto úhlu je na povrchu 2. prostředí generována Rayleighova vlna a to při splnění rovnice (1.31).

Pro 3. kritický úhel platí:

$$\sin \alpha_{L1} = \frac{c_{L1}}{c_{R2}}, \quad (1.31)$$

kde  $c_{R2}$  je rychlost šíření Rayleighovy vlny 2. prostředím.

## 1.4 Mechanika kontinua v tuhém prostředí

### 1.4.1 Geometricko-deformační vztahy

Pohyb částice je popsán vektorem  $\mathbf{u}_i = \{u, v, w\}$ , vyjadřující pohyb částice z nedeformovaného stavu do polohy v deformovaném stavu.

Deformace elementární krychle je dána poměrnými změnami délek jejích tří stran



a tří úhlů mezi jejími stěnami. Pro délkové přetvoření  $\varepsilon$  platí:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad (1.32)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad (1.33)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}. \quad (1.34)$$

Pro úhlové přetvoření  $\gamma$  platí:

$$\gamma_{xy} = \gamma_{yx} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}, \quad (1.35)$$

$$\gamma_{yz} = \gamma_{zy} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}, \quad (1.36)$$

$$\gamma_{xz} = \gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}. \quad (1.37)$$

Těchto 9 komponentů přetvoření lze uspořádat do jedné matice – tenzoru přetvoření:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \gamma_{xy} & \gamma_{xz} \\ \gamma_{yx} & \varepsilon_y & \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} & \gamma_{zy} & \varepsilon_z \end{bmatrix}. \quad (1.38)$$

### 1.4.2 Silové a napěťové vztahy

Pro popis napjatosti elementární krychle se zavádí tenzor napjatosti:

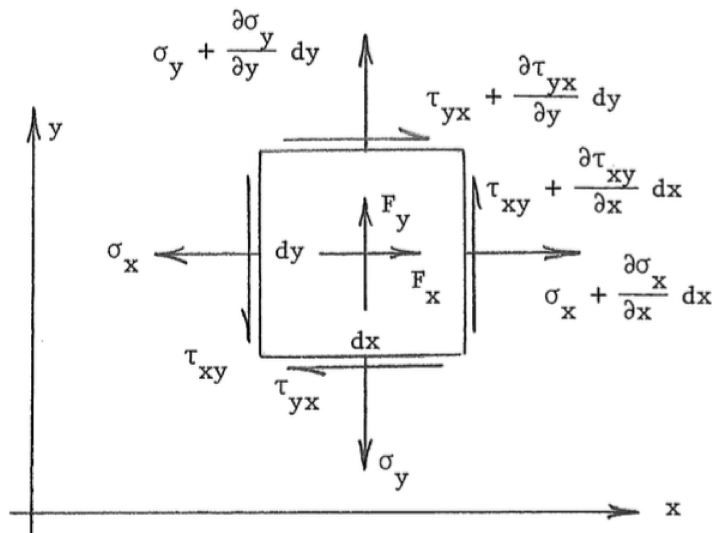
$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix}. \quad (1.39)$$

Obsahuje 9 složek – 3 normálové složky napětí  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  a 6 smykových složek napětí  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{xz}$ ,  $\tau_{yx}$ ,  $\tau_{yz}$ ,  $\tau_{zx}$  a  $\tau_{zy}$ . Dále platí zákon o sdruženosti smykových napětí:

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}, \quad \tau_{xz} = \tau_{zx}, \quad \tau_{yz} = \tau_{zy}. \quad (1.40)$$

### 1.4.3 Pohybové rovnice

Pohybové rovnice jsou založeny na principu rovnováhy s uvažováním zákona o zachování hybnosti. Pro jednoduchost jsou následující rovnice řešeny pro dvojrozměrný element dle obrázku 10.



Obrázek 10: Znázornění normálových a smykových napětí ve dvourozměrném elementu [6]

Platí tedy:

$$\begin{aligned} (\sigma_x + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx) dy - \sigma_x dy + \left( \tau_{yx} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} dy \right) dx - \tau_{yx} dx + F_x dx dy &= \rho dx dy \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \\ \left( \sigma_y + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} dy \right) dx - \sigma_y dx + \left( \tau_{xy} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} dx \right) dy - \tau_{xy} dy + F_y dx dy &= \rho dx dy \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}, \end{aligned} \quad (1.41)$$

kde  $\rho$  je hustota prostředí,  $F_x$  a  $F_y$  jsou objemové síly. Úpravou (10) bylo dosaženo tvaru:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + F_x &= \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + F_y &= \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}. \end{aligned} \quad (1.42)$$

Pro 3D prostor mají rovnice (1.42) tvar:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + F_x &= \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + F_y &= \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}, \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + F_z &= \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}.\end{aligned}\tag{1.43}$$

#### 1.4.4 Hookeův zákon

Pro homogenní a izotropní materiál platí

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \lambda_L (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) + 2\mu_L \varepsilon_x & \tau_{xy} &= \mu_L \gamma_{xy} \\ \sigma_y &= \lambda_L (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) + 2\mu_L \varepsilon_y & \tau_{yz} &= \mu_L \gamma_{yz} \\ \sigma_z &= \lambda_L (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) + 2\mu_L \varepsilon_z & \tau_{zx} &= \mu_L \gamma_{zx}\end{aligned}\tag{1.44}$$

kde  $\lambda_L$  a  $\mu_L$  jsou materiálové konstanty – Lamého parametry [7]

$$\begin{aligned}\lambda_L &= \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \\ \mu_L &= \frac{E}{2(1+\nu)}\end{aligned}\tag{1.45}$$

kde  $E$  je modul pružnosti v tahu a  $\nu$  je Poissonovo číslo.

Celkové přetvoření je popsáno dilatací  $\mathbf{v}$ :

$$\mathbf{v} = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}.\tag{1.46}$$

#### 1.4.5 Odvození řídicí rovnice šíření vln

Využitím Hookeova zákona (1.44) a geometricko-deformačních vztahů (1.32 až 1.37) lze eliminovat napětí v pohybových rovnicích (1.43). Úpravou pro směr  $x$  vychází:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + F_x = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2},\tag{1.47}$$

kde  $F_x$  je objemová síla. V tomto případě je  $F_x = 0$ . Dosazením vztahů (1.44) získávají rovnice tvar:

$$\frac{\partial}{\partial x} [\lambda_L (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) + 2\mu_L \varepsilon_x] + \frac{\partial}{\partial y} (\mu_L \gamma_{xy}) + \frac{\partial}{\partial z} (\mu_L \gamma_{zx}) = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2},\tag{1.48}$$

tedy:

$$\begin{aligned} \lambda_L \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial x} + 2\mu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu_L \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu_L \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu_L \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}. \end{aligned} \quad (1.49)$$

Dosazením dilatace dle rovnice (1.46):

$$\mu_L \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \lambda_L \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial x} + \mu_L \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad (1.50)$$

finálně:

$$\mu_L \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + (\lambda_L + \mu_L) \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial x} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1.51)$$

Pro trojrozměrný případ lze řídicí rovnici šíření vln zapsat následovně (vektory jsou značeny tučně):

$$\mu_L \nabla^2 \mathbf{u} + (\lambda_L + \mu_L) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}) = \rho \ddot{\mathbf{u}}, \quad (1.52)$$

kde  $\nabla$  je diferenciální operátor nabla:

$$\nabla = \left( \frac{\partial}{\partial x}, \dots, \frac{\partial}{\partial x_n} \right). \quad (1.53)$$

#### 1.4.6 Řídicí rovnice šíření podélných a příčných vln

V případě šíření podélných vln (dilatační šíření) dochází k objemovým změnám v materiálu, které jsou popsány dilatací  $\mathbf{v}$ . Veličina popisující (v tomto případě) celkové přetvoření je diferenciální operátor divergence:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \dots + \frac{\partial u_n}{\partial x_n}. \quad (1.54)$$

Aplikací divergence na rovnici (1.52) byla získána řídicí rovnici šíření podélných vln:

$$\mu_L \nabla^2 (\nabla \cdot \mathbf{u}) + (\lambda_L + \mu_L) \nabla^2 (\nabla \cdot \mathbf{u}) = \rho \ddot{\nabla \cdot \mathbf{u}}, \quad (1.55)$$

po úpravě byla obdržena rovnice:

$$(\lambda_L + 2\mu_L) \nabla^2 \mathbf{v} = \rho \ddot{\mathbf{v}}. \quad (1.56)$$

Tuto rovnici lze také zapsat tvarem:

$$\nabla^2 \mathbf{v} = \frac{\rho}{\lambda_L + 2\mu_L} \ddot{\mathbf{v}} = \frac{1}{c_L^2} \ddot{\mathbf{v}}, \quad (1.57)$$

s tím, že rychlost šíření podélné vlny je dána rovnicí:

$$c_L = \sqrt{\frac{\lambda_L + 2\mu_L}{\rho}}. \quad (1.58)$$

U šíření příčných (ekvivoluminálních) nedochází k objemovým změnám. Platí tedy, že dilatace, popisující celkové přetvoření, je rovna nule. Z rovnice (1.52) plyne:

$$\mu_L \nabla^2 \mathbf{u} = \rho \ddot{\mathbf{u}}. \quad (1.59)$$

což je řídicí rovnice příčných (ekvivoluminálních) vln. Rovnici (1.59) lze přepsat na tvar:

$$\nabla^2 \mathbf{u} = \frac{\rho}{\mu_L} \ddot{\mathbf{u}} = \frac{1}{c_T^2} \ddot{\mathbf{u}}, \quad (1.60)$$

kde rychlost šíření příčných vln je dána rovnicí:

$$c_T = \sqrt{\frac{\mu_L}{\rho}}. \quad (1.61)$$

## 2 Úvod do ultrazvukové defektoskopie

Průkopníkem ultrazvukové defektoskopie byl sovětský fyzik S. J. Sokolov, který roku 1929 publikoval postup zjišťování vnitřních nehomogenit prostřednictvím ultrazvuku. Velký rozmach však ultrazvuková defektoskopie zažila až v padesátých letech, kdy ultrazvuk pronikl i do dalších technických oborů [1].

Výhodami ultrazvuku ve strojním použití jsou především:

- schopnost šířit se materiálem na značné vzdálenosti,
- možnost iniciovat vlnění na povrchu,
- citlivost i na drobné vady v materiálu,
- schopnost určit přibližnou velikost vad a jejich polohu,
- možnost zavedení automatizované kontroly.

Společně s radiografií (prozařování materiálu) patří ultrazvuková defektoskopie k nejčastěji užívaným metodám pro detekci vad v materiálu.

Postup pro ultrazvukovou defektoskopii je následující:

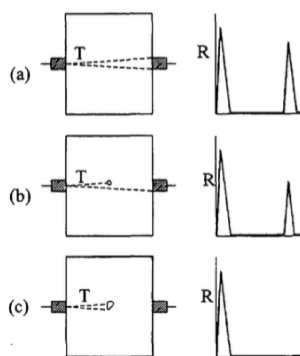
- 1) Kalibrace měřicího přístroje pomocí ultrazvukových měrek,
- 2) očistit zkoumanou oblast výrobku od barvy, špíny a mastnoty,
- 3) nanést vazební prostředek,
- 4) přiložit snímač nebo předsádku se snímačem a zkontrolovat zkoumanou oblast (metody uvedeny v kapitole 2.1),
- 5) vyhodnotit naměřená data.

### 2.1 Měřicí metody

#### 2.1.1 Průchodová metoda

Tato metoda užívá dvou ultrazvukových snímačů. Jeden vlny vysílá, druhý přijímá (obr. 11). Užívá se jak spojitě tak impulzové varianty.

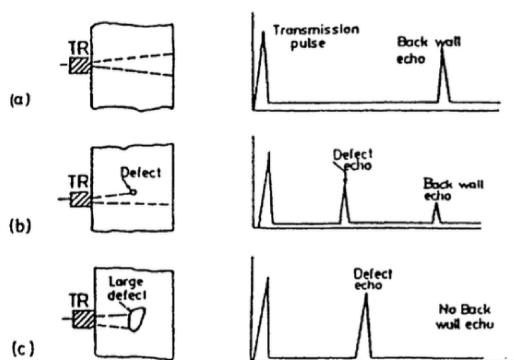
Průchodová metoda se užívá především u velkých součástí, odlitků, ingotů a u součástí s velkým útlumem. Nedokáže lokalizovat vadu ani její velikost. Slouží jen k detekci přítomnosti vady [1, 2].



Obrázek 11: Průchodová metoda. (a) Výrobek bez vady, (b) Výrobek s malou vadou, (c) výrobek s velkou vadou [2]

### 2.1.2 Impulzní odrazová metoda

Impulzní odrazová metoda patří k nejčastěji užívaným metodám ultrazvukové defektoskopie. Impulzní z toho důvodu, že místo spojitého vysílání vln jsou vysílány jen krátké impulzy. Vysílač a přijímač jsou umístěny na jedné straně zkoumaného výrobku a vada je detekována přítomností echa, které k přijímači dorazí dříve než echo od zadní strany výrobku (viz obr. 12). Většinou se užívá jeden snímač, který se chová jako vysílač i přijímač signálu.



Obrázek 12: Impulzní odrazová metoda. (a) Výrobek bez vady, (b) Výrobek s malou vadou, (c) výrobek s velkou vadou [2]

### 2.1.3 Rezonanční metoda

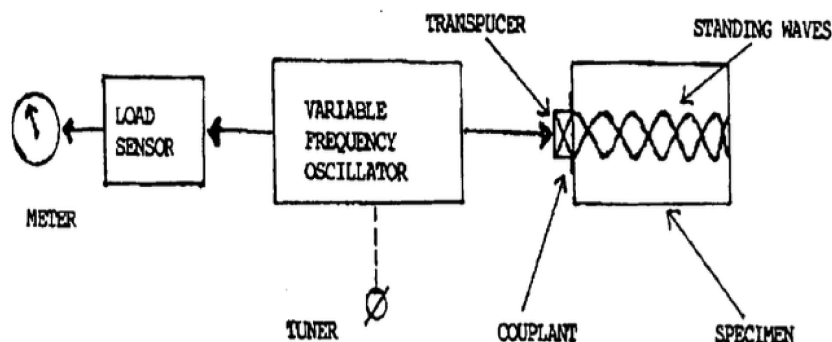
Při podmínkách, kdy tloušťka materiálu odpovídá polovině vlnové délky vlny nebo jejích násobcích vzniká rezonance. Těchto podmínek lze dosáhnout nastavením frekvence na přístroji dle rovnice:

$$t_m = \frac{c}{2f}, \quad (2.1)$$



kde  $f$  je frekvence,  $c$  je rychlost šíření vlny a  $t$  je tloušťka materiálu.

Tato metoda byla dříve užívána pro měření tloušťky tenkých výrobků, ale byla nahrazena pulzní odrazovou metodou díky pokroku v oblasti vývoje ultrazvukových snímačů [2].



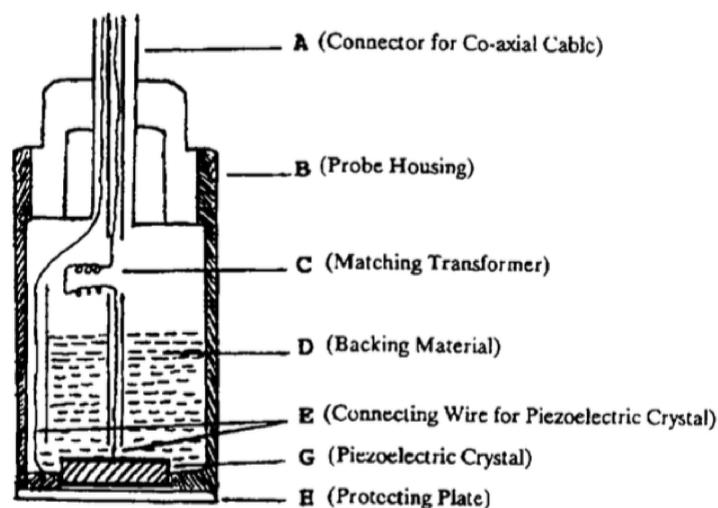
Obrázek 13: Rezonanční metoda. [2]

## 2.2 Měřicí technika

### 2.2.1 Piezoelektrické snímače

Piezoelektrické snímače pracují na principu piezoelektrického jevu, což je vlastnost některých materiálů, kdy při přivedení elektrického napětí na piezoelektrický materiál nastává jeho deformace. Tento jev funguje i obráceně – je-li piezoelektrický materiál deformován, tvoří se napětí. Typickým příkladem tohoto jevu jsou elektrické zapalovače, kdy při úderu do piezoelektrického materiálu vzniká elektrické napětí a dále jiskra, která zapálí plyn.

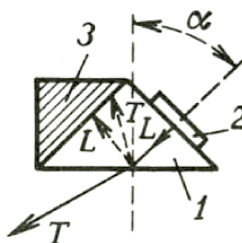
Koaxiálním kabelem je přivedeno napětí, které způsobí deformaci piezoelektrického materiálu. Tato deformace se pak přenáší do materiálu a lze jí vybudit ultrazvukovou vlnu. Naopak, když vlna přejde z materiálu do snímače, deformací piezoelektrického materiálu vzniká napětí, které je přeneseno koaxiálním kabelem do měřicího přístroje k vyhodnocení. Konstrukce piezoelektrického snímače je znázorněna na obrázku 14.



Obrázek 14: Piezoelektrický snímač. A – konektor pro koaxiální kabel, B – tělo snímače, C – kompenzace impedance, D – tlumicí materiál, E – připojení vodiče k piezoelektrickému materiálu, G – piezoelektrický materiál, H – ochranná deska [2]

### 2.2.2 Úhlové předsádky

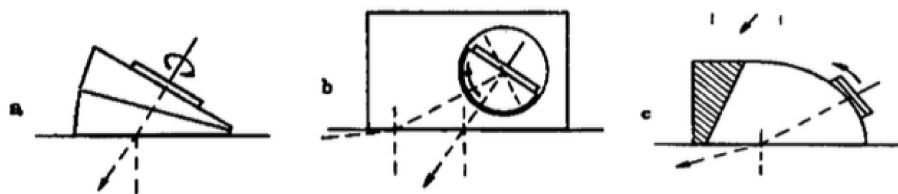
Při použití úhlových předsádek se využívá lomu a transformace vln k jejich vysílání do materiálu pod požadovanými úhly. Typická konstrukce tohoto typu předsádky je znázorněna na obrázku 15.



Obrázek 15: Úhlová předsádka 1 – tělo předsádky, 2 – úchyt pro snímač, 3 – tlumicí tělísko [1]

Využívá se úhlů překračujících 1. kritický úhel pro rozhraní materiál předsádky/materiál výrobku pro generaci příčných vln a dále úhlů překračujících 3. kritický úhel pro stejné rozhraní ke generaci povrchových vln.

Na obrázku 16 jsou znázorněny příklady předsádek s měnitelnou geometrií. Tento typ předsádek je vhodný pro techniku zkoumajícího výrobky z různých materiálů a dovoluje přenastavit normálový úhel natočení snímače a tím nastavit požadovaný typ vysílaných vln.



Obrázek 16: Ukázky konstrukcí úhlových předsádek s měnitelnou geometrií [2]

### 2.2.3 Vazební prostředky

Vazební prostředky slouží k zajištění optimálního přenosu vlny mezi tuhými prostředími. Jsou k dispozici komerční výrobky jako např. Ankoril, ale často se také užívají náhražky (oleje, tuky, med).

### 3 Návrh plexipředsádky

Předsádka slouží k generaci podélných, příčných a Rayleighových vln v požadovaném směru šíření v materiálu.

Často bývá vyrobena z polymethylmethakrylátu (PMMA), kterému se běžně říká plexisklo. Plexisklo je ideální ve smyslu vhodného poměru rychlosti šíření vln v plexiskle a oceli (viz 1.3.2). Díky tomu je možné generovat požadované typy vln v požadovaných směrech.

Existuje mnoho typů a konstrukcí předsádek, které se liší především v úhlu pod kterým je umístěn snímač a velikosti úchyty pro snímač.

Úkolem této práce je zkonstruovat a vyrobit univerzální úhlovou předsádku pro generaci různých typů ultrazvukových vln. Příkladem může být předsádka OLYMPUS ABWX-2001 (obr. 17) s nastavitelným úhlem snímače.

Předsádka navržená autorem bakalářské práce byla vyrobena z plexiskla s označením PLEXIGLAS XT (výrobce Evonik-Röhm, tloušťka 25 mm) frézováním.



Obrázek 17: Předsádka OLYMPUS ABWX-2001 [8]

#### 3.1 Požadavky na plexipředsádku

Základním požadavkem je rozsah nastavení úhlu plexipředsádky. Při ultrazvukovém NDT se nejčastěji užívají úhly<sup>5</sup> v rozmezí 28–70°. Tento rozsah leží (pro rozhraní plexisklo/ocel) za 1. kritickým úhlem (cca 26°) a obsahuje i 3. kritický úhel (cca 65,5°). Do oceli tedy bude možné generovat pouze příčné a Rayleighovy vlny a při nastavení úhlu nad hodnotu 65,5° pouze Rayleighovy vlny.

Další požadovanou vlastností je schopnost směřovat vlny odražené od rozhraní plexisklo/ocel při generování samotné vlny v oceli tak, aby se vhodně rozptýlily a utlumily

---

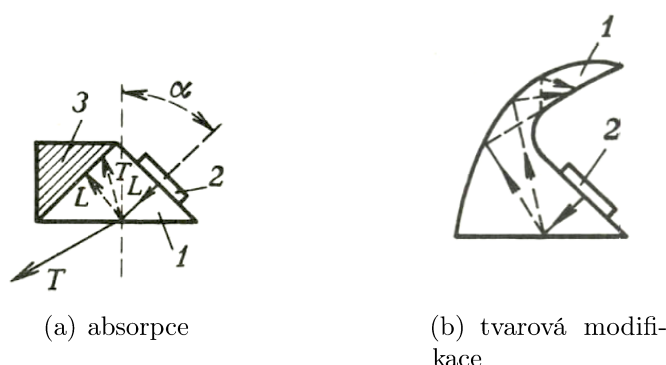
<sup>5</sup>měřeno na předsádce, bráno vzhledem k normále měřeného povrchu

(zabránit šíření vlny směrem ke snímači). Této vlastnosti lze dosáhnout více způsoby.

Nejčastěji je využíváno tlumícího prostředí umístěného v protilehlé straně (od snímače) předsádky. Tlumícím prostředím bývá umělá pryskyřice či tvrdá pryž [1]. Výhodou tohoto provedení jsou menší rozměry předsádky.

Tato práce však užívá druhou možnost – modifikaci tvaru plexipředsádky. Odrazy jsou tedy směřovány do výběžku, kde dochází k násobným odrazům a konečnému útlumu vln, jelikož plexisklo má cca  $250\times$  větší součinitel útlumu než ocel (viz kapitola 1.1.7). Snahou je tedy maximalizovat četnost odrazů ve výběžku.

Často se také protilehlé stěny drážkují, aby se dopadající vlna roztříštila.



Obrázek 18: Možnosti tlumení odrazů v předsádkách [1]

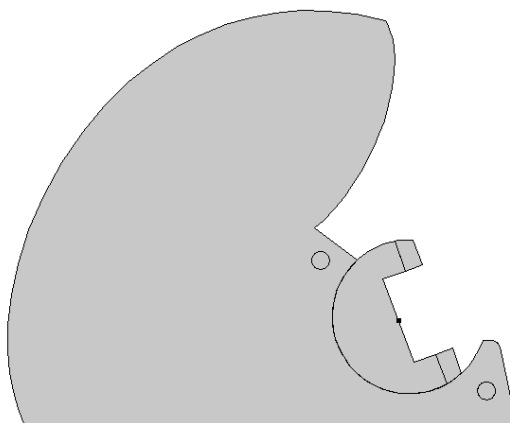
Schopnost plexiskla vlny absorbovat je ale také jistým omezením. Aby vlna přešla do oceli v požadované intenzitě, musí od snímače k povrchu testovaného materiálu urazit co nejmenší dráhu.

Posledním požadavkem bylo, aby se vlna, které dopadá na rozhraní, pohybovala pod předsádkou po minimální dráze. V opačném případě dochází ke značnému útlumu vlny.

## 3.2 Zvažované konstrukce

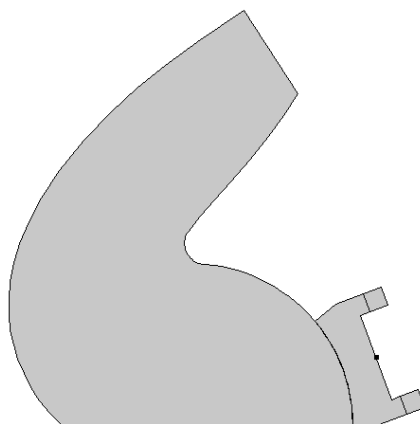
Byla zvažována varianta se snímačem umístěným ve válcové části předsádky otáčející se v samotné plexipředsádce. Zamezit samovolnému pootočení bloku plexiskla by bylo možné pomocí svěrného spojení.

Pro potřeby dosažení maximálního úhlu  $70^\circ$  by ale předsádka měla značné rozměry. Výsledkem (obr. 19) by byla předsádka s výškou a délkou přes 70 mm s velmi nevhodnou geometrií výběžku. Proto bylo od této konstrukce upuštěno.



Obrázek 19: Návrh předsádky s otočnou válcovou částí

Další možností bylo použití podobné konstrukce jako OLYMPUS ABWX-2001 (obr. 17) a to s obloukem, na kterém je umístěn posuvný blok s uchycením snímače. Při použití této konstrukce se při změně úhlu poloha dopadu nemění a předsádka tedy může být menších rozměrů. Z výrobních důvodů musí mít posuvný blok zkosené stěny (viz obr. 20), umožňující dosažení širšího rozmezí pro nastavení úhlu dopadu, při zachování malého poloměru oblouku plexipředsádky.



Obrázek 20: Výsledný návrh předsádky

Model navržené plexipředsádky je přiložen na CD (soubor sestava\_predsadky.iam).

### 3.3 MKP simulace

Simulace byla provedena metodou konečných prvků (MKP, anglicky FEM – finite element method) s užitím softwaru COMSOL. Úkolem simulace bylo nalézt optimální tvar stěny plexipředsádky odrážející vlny do výběžku a výběžku samotného.

### 3.3.1 COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics je výkonný software pro FEM analýzu. Hlavní výhodou tohoto softwaru je možnost rozšiřovat jej pomocí modulů – např. AC/DC, Acoustic, Heat Transfer, Structural Mechanics,... [9]. Na jeden model lze aplikovat i více modulů zároveň, takže např. při simulaci reproduktoru lze jako okrajovou podmínku nastavit frekvenci proudu proudícího cívkou a řešením bude intenzita zvuku v předepsané vzdálenosti.

Pro simulaci šíření ultrazvukových vln v plexipředsádce bude využit právě Structural Mechanics<sup>6</sup>.

### 3.3.2 Tvorba geometrie a sítě konečných prvků

S ohledem na výpočetní náročnost byla úloha řešena jako 2D úloha rovinné deformace. Model předsádky je uveden na obrázku 21 včetně definic jednotlivých částí a zaznačení polohy měřícího bodu. Součástí modelu je rovněž fiktivní ocelový plech pod předsádkou, aby bylo možné pozorovat šíření vln v měřeném materiálu. Úhel natočení bloku se snímačem byl definován parametricky, odrazná strana a výběžek byl vytvořen pomocí Bézierovy křivky a zbytek předsádky byl vytvořen pomocí binárních operací (union, difference). Měřící bod, který byl umístěn na povrchu ocelové desky, díky němuž bylo možné určit průběhy kýžených složek vektoru posunutí s cílem detekovat Rayleighovu vlnu.

Síť byla tvořena elementy velikosti, aby byl splněn předpoklad nejméně 10 elementů na vlnovou délku. Velikost elementu byla tedy spočítána dle rovnice:

$$\Delta x = \frac{\lambda}{10} = \frac{c}{100f}, \quad (3.1)$$

kde  $c$  je rychlost šíření vlny (podélné vlny) a  $f$  je frekvence  $f = 1$  MHz. Pro plexisklo vychází velikost  $\Delta x_{PMMA} = 2,67 \times 10^{-4}$  m a ocel  $\Delta x_{ocel} = 6 \times 10^{-4}$  m.

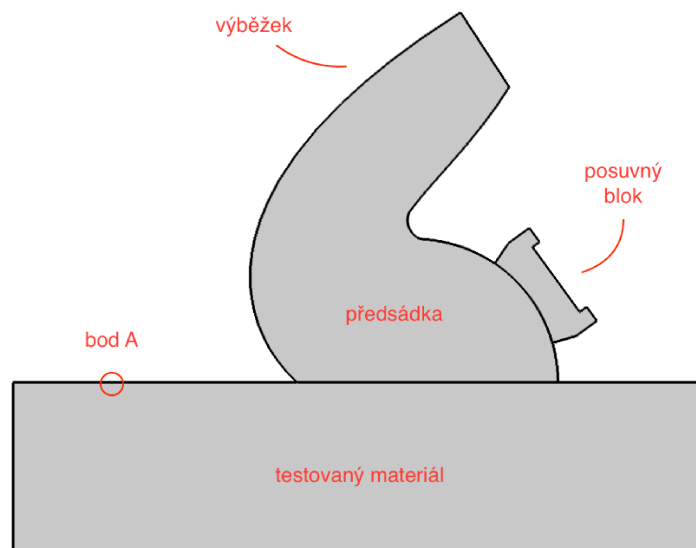
Pro zaručení stability numerického řešení bylo třeba zkontrolovat velikost elementu a časový krok pomocí Courant-Friedrich-Lewyho (CFL) podmínky pro 2D [10]

$$\Delta t \leq \frac{1}{c} \left( \frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right)^{-\frac{1}{2}}, \quad (3.2)$$

kde  $\Delta x$  a  $\Delta y$  jsou velikosti elementu ve směrech  $x$  a  $y$  (které jsou shodné),  $\Delta t$  je časový

---

<sup>6</sup>dostupná licence COMSOL Multiphysics neobsahuje modul Acoustic, který by byl pro tuto práci vhodný



Obrázek 21: Návrh předsádky včetně testovaného materiálu

krok,  $c$  je rychlost šíření vlny. Po dosazení (parametrů pro ocel<sup>7</sup>) tedy vychází

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x_{ocel}}{\sqrt{2}c_{L,ocel}} = 7,07 \times 10^{-8} \text{ s} \quad (3.3)$$

maximální velikost časového kroku  $\Delta t$ .

Úloha byla řešena pro časový úsek od 0 do 120  $\mu\text{s}$  s časovým krokem  $\Delta t = 10 \text{ ns}$ , což vyhovuje CFL podmínce. Zároveň je tato hodnota přijatelná vzhledem k výpočetní náročnosti a zejména k pozorování šíření vln.

Výsledná síť obsahuje 102732 elementů a skládá se jak z trojúhelníkových, tak čtyřúhelníkových elementů. Diskretizace byla realizována lineárními prvky.

Materiál předsádky byl zaveden jako PMMA (plexisklo) a ocel. Materiálové konstanty byly importovány z knihovny materiálů COMSOLu. Bylo třeba doplnit rychlosti šíření zvuku v materiálu dle tab. 1. Plexisklo je viskoelastickým materiálem, což znamená, že hodnota jeho modulu pružnosti v tahu (a tedy i ve smyku) je závislá na teplotě. Počítáno je za konstantní teploty, tudíž s konstantním modulem pružnosti v tahu.

### 3.3.3 Okrajové podmínky

Okrajová podmínka, simulující pohyb piezoelektrického měniče, byla předepsána posuvem v normálovém směru v místě kontaktu snímače a posuvného bloku, a to v následu-

---

<sup>7</sup>vychází stejně i pro PMMA



jícím tvaru:

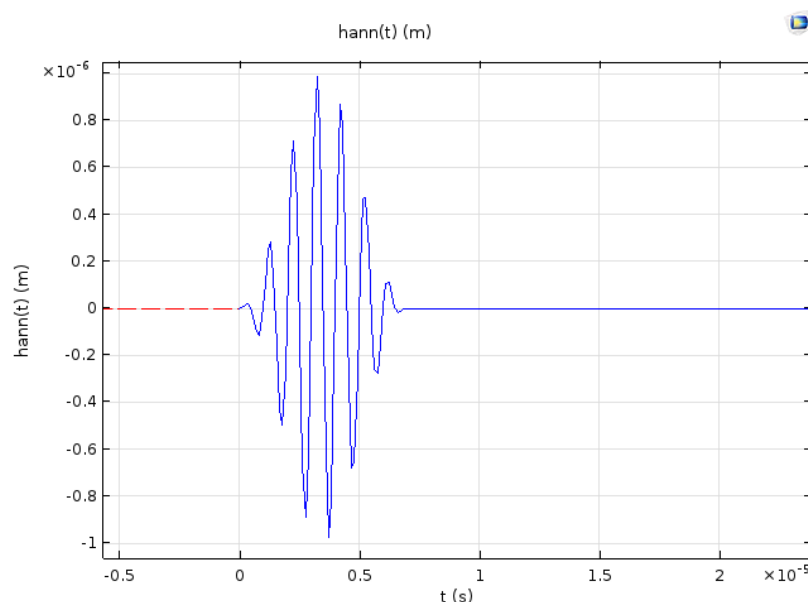
$$a(t) = A \sin 2\pi ft, \quad (3.4)$$

kde frekvence  $f = 1$  MHz, amplituda výchylky  $A = 1 \mu\text{m}$ .

Bylo vysláno celkem 7 pulzů modulovaných Hannových oknem ve tvaru [11]:

$$w(t) = 0.5 \left[ 1 - \cos \left( \frac{2\pi t}{t_{\text{signal}}} a(t) \right) \right], \quad (3.5)$$

kde  $t$  je čas a  $t_{\text{signal}}$  je délka signálu čítající 7 period kmitů. Tato funkce působí jen v časovém intervalu od 0 do  $t_{\text{signal}}$  (v COMSOLu zavedeno pomocí piecewise funkce). Tvar budicí funkce je znázorněn na obr. 22.



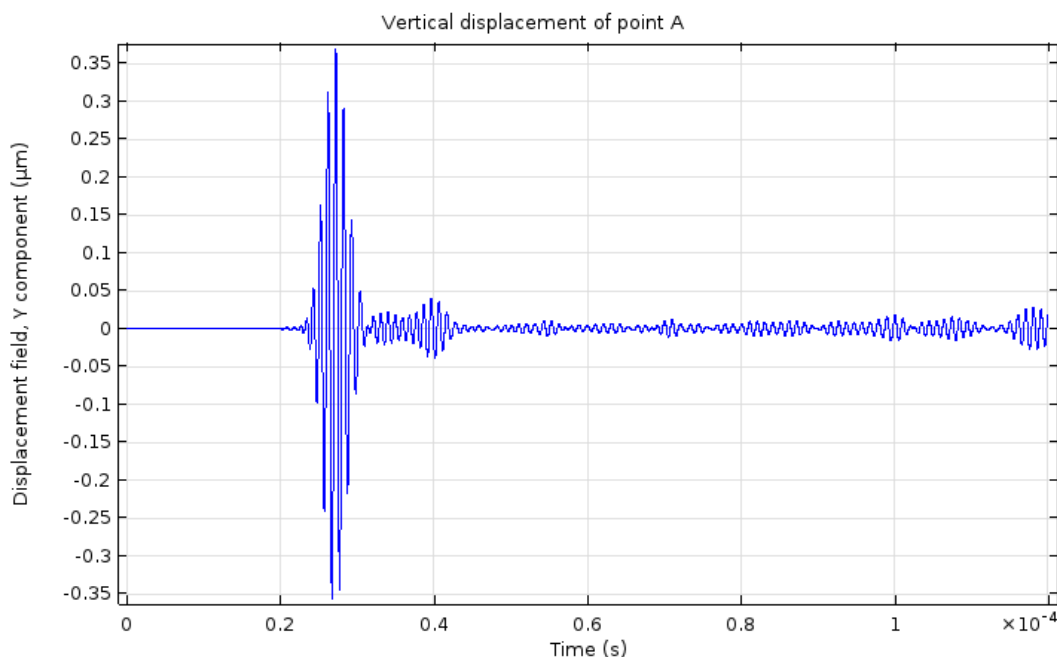
Obrázek 22: Vlnový balíček formovaný Hannovým oknem

Další okrajovou podmínkou bylo zavedení tzv. low-reflecting boundary condition (podmínka hranice s nízkou odrazivostí) na bocích ocelové desky pod předsádkou, z důvodu eliminování odrazů na těchto hranicích.

### 3.3.4 Výsledky simulace

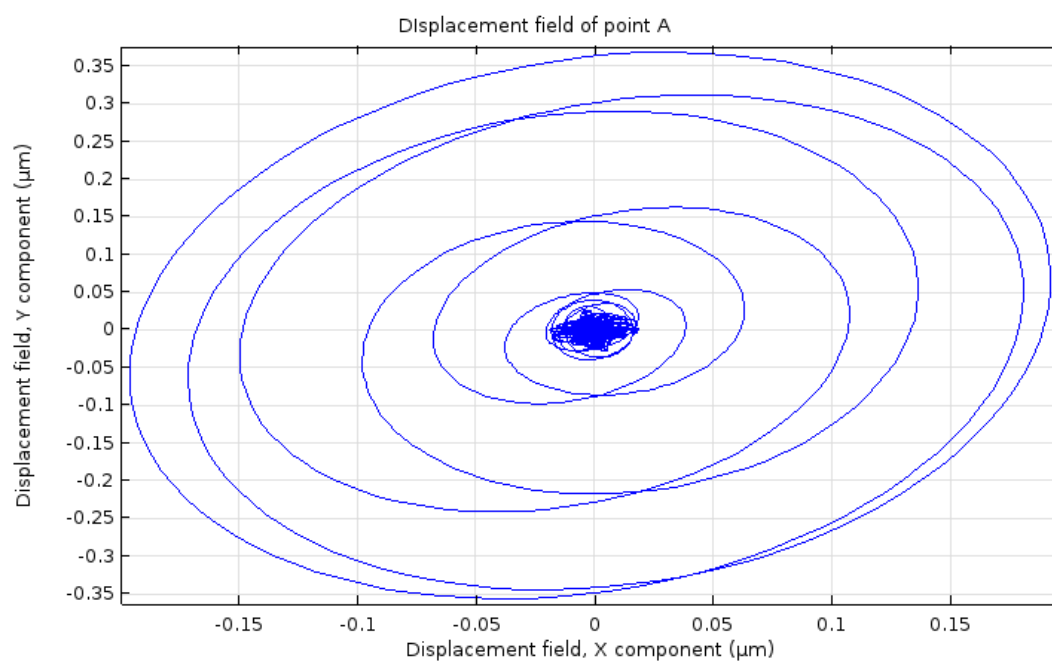
Jak bylo zmíněno dříve, MKP simulace sloužily především k optimalizaci tvaru funkční částí plexipředsádky, které má za úkol vlny zpětně odražené do plexipředsádky eliminovat s využitím vícenásobných odrazů a tlumících vlastností plexiskla. K posouzení samotné funkčnosti plexipředsádky sloužily jednak časové průběhy pole posuvů v dané geometrii (Příloha A, Příloha B a Příloha C) a dále také průběh horizontální a vertikální složky vektoru posunutí ve zmíněném bodě, ve kterém bylo možné detekovat plexipředsádkou generovanou Rayleighovu vlnu (obr. 23). S ohledem na rozsáhlost této bakalářské práce jsou v této sekci uvedeny pouze výsledky finální verze navržené plexipředsádky pro testovací bod.

Na grafu (obr. 24) lze pozorovat časový průběh vertikálního a horizontálního posunutí testovacího bodu. Je zřejmé, že tvar těchto křivek se podobá elipsám, což koresponduje s teorií, že při normálovém úhlu  $70^\circ$  dopadající podélné vlny<sup>8</sup> vzniká Rayleighova vlna, při které se částice na povrchu pohybují po tvaru protáhlé elipsy.



Obrázek 23: Časový průběh vertikálního posunutí

<sup>8</sup>tento úhel překračuje 3. kritický úhel na rozhraní plexiskla a oceli. Hodnota kritického úhlu pro rozhraní PMMA/ocel je cca  $65,5^\circ$ .



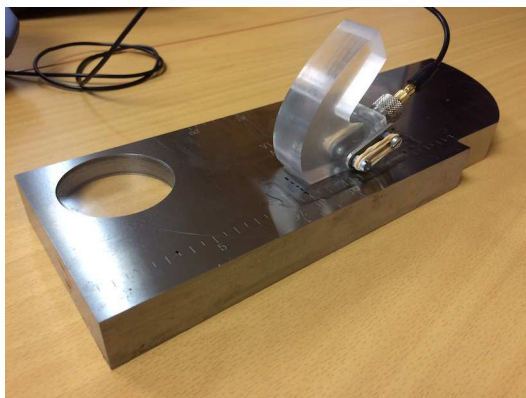
Obrázek 24: Časová závislost posunutí v horizontálním (osa x) a vertikálním směru (osa y)

Soubor simulace je přiložen na CD (simulace.mph).

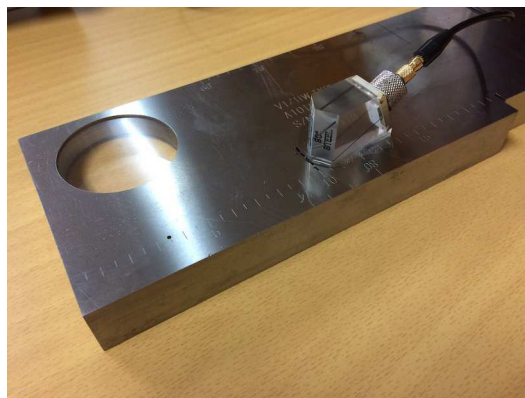
## 4 Experimentální ověření vyrobené plexisádky

Navržená a posléze vyrobená plexisádky byla testována oproti plexisádky Olympus ABWML-7T-90 s pevným úhlem roviny snímače. Plexisádky Olympus ABWML-7T-90 je vhodná pro generaci povrchových vln v oceli, takže aby bylo měření vypovídající, byla navrhovaná plexisádky také nastavena pro generaci povrchových vln (normálový úhel cca  $70^\circ$ ).

Měření bylo provedeno pomocí přístroje Olympus Epoch 600 ve spojení se snímačem Olympus Panametrics A551S-SM (5 MHz) impulzně odrazovou metodou. Jako vazební prostředek byl použit vazební gel Ankoril. Měření probíhalo na standardní měrce K1 ve vzdálenosti 100 mm od okraje měrky (obr. 25).



(a) Navrhovaná plexisádky



(b) Olympus ABWML-7T-90

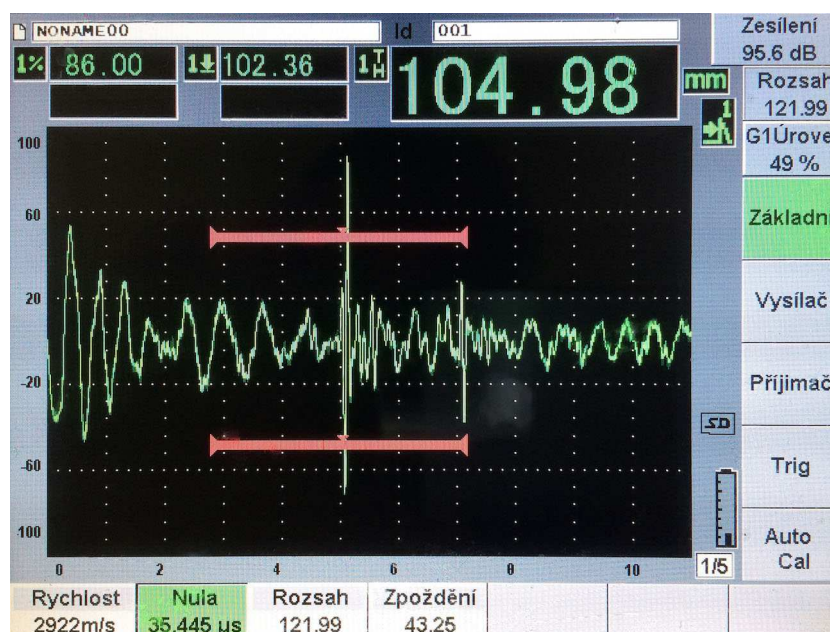
Obrázek 25: Měření s plexisádkami

### 4.1 Měření parametrů plexisádky

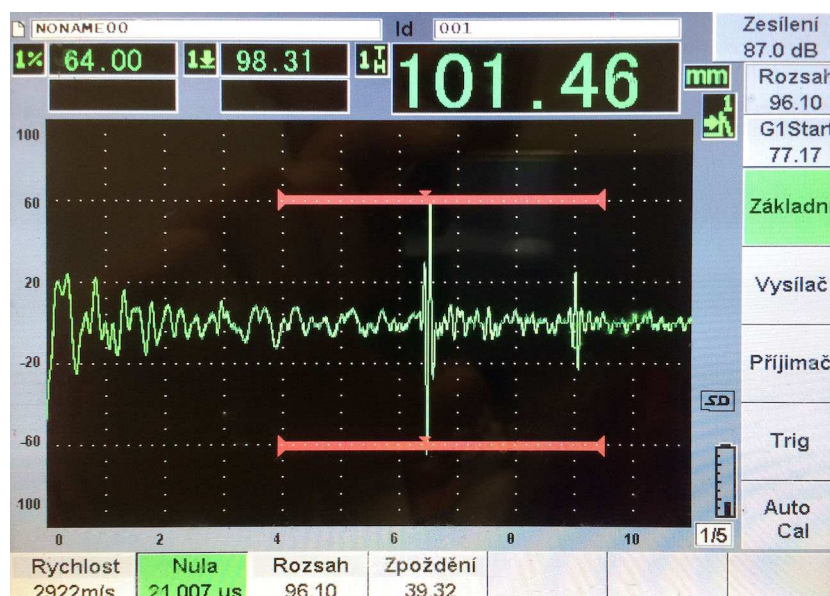
Na obrázcích 26 je patrné echo od 100 milimetrů vzdálené hrany na ultrazvukové měrce K1, na kterých je možné kvalitativně zhodnotit záznamy ech v případě navržené plexisádky (obr. 4a) a originální plexisádky, dodávané firmou Olympus (obr. 4b). V obou případech můžeme pozorovat poměrně výrazná echa, která jsou dostatečně izolována od ostatních rušivých vlivů (odrazy, interakce snímače a plexisádky atd.). V následující kapitole je uvedeno vyhodnocení amplitud ech u obou plexisádek. Naměřené hodnoty jsou zaznamenány v tabulce 4.

Tabulka 4: Naměřené hodnoty u plexipředsádek

Předsádka	Poměrná velikost amplitudy	Zesílení
Navrhovaná předsádka	86 %	95,6 dB
Olympus ABWML-7T-90	64 %	87 dB



(a) Navrhovaná plexipředsádka



(b) Olympus ABWML-7T-90

Obrázek 26: Zaznamenané velikosti ech v procentech u obou plexipředsádek

## 4.2 Vyhodnocení měření

Vzhledem k tomu, že bylo u obou měření použito různých hodnot zesílení signálu, je nutné naměřené velikosti amplitud přepočítat na stejnou hodnotu zesílení signálu. Pro výpočet rozdílu zesílení vzhledem k výšce echa v procentech platí:

$$\Delta A = 20 \log \frac{H_2}{H_1}, \quad (4.1)$$

kde  $\Delta A$  vyjadřuje zesílení v dB odpovídající poměru velikosti výšek ech  $H_1$ ,  $H_2$  v procentech. Úpravou a následným dosazením je možné určit vztah resp. hodnotu pro přepočet výšky echa pro zesílení (gain) přístroje, které má odlišnou od té, při které byla výška echa původně získána.

$$\frac{H_2}{H_1} = 10^{\frac{A_2 - A_1}{20}} = 10^{\frac{95,6 - 87}{20}} = 2,6915.$$

Hodnota přepočtené poměrné velikosti amplitudy  $H_1 = 64\%$  ze zesílení 87 dB na zesílení 95,6 dB je tedy rovna:

$$H_2 = 2,6915 H_1 = 172,256.$$

Porovnání naměřených hodnot obou předsádek při stejných hodnotách zesílení bylo provedeno pomocí rovnice (4.1):

$$\Delta A = 20 \log \frac{H_2}{H_1} = 20 \log \frac{172,256}{86} = 6,0335 \text{ dB},$$

kde v tomto případě  $\Delta A$  vyjadřuje rozdíl amplitud při stejném zesílení. Vypočtená hodnota odpovídá přibližně poloviční amplitudě detekované vlny při použití navrhované předsádky s měnitelnou geometrií oproti předsádce Olympus ABWML-7T-90 s pevnou geometrií.

## Závěr

Předložená bakalářská práce se zabývá návrhem univerzální ultrazvukové plexipředsádky s měnitelnou geometrií s využitím metody konečných prvků (COMSOL Multiphysics) včetně výroby navrženého prototypu a jeho následném testování.

Autor bakalářské práce se zaměřil především na design funkční části předsádky, umožňující do jisté míry eliminovat nežádoucí odrazy incidentního ultrazvukového svazku od rozhraní plexisklo/ocel, které negativně ovlivňují samotné vyhodnocování ech od případných vad. Geometrie funkční části plexipředsádky je navržena tak, aby docházelo k vícenásobným odrazům nežádoucích vln až k jejich konečnému utlumení vlivem tlumících vlastností plexiskla. Tvar funkční části předsádky byl optimalizován tak, aby tento předpoklad platil pro co největší rozsah úhlů dopadu na rozhraní plexisklo/ocel.

Simulace pomocí metody konečných prvků byly provedeny pro řez plexipředsádkou užitím zjednodušení rovinné deformace z důvodu výpočetní náročnosti. Model předsádky obsahoval přibližně 100 000 elementů. Buzení ve formě normálového posunutí v místě kontaktu mezi snímačem a posuvným blokem bylo realizováno prostřednictvím sinusového signálu modulovaného Hannovým oknem. Budící signál obsahoval celkem sedm sinusových pulzů. Nutno podotknout, že s ohledem na lepší analýzu dat, byla na okrajové části segmentu ocelové desky definována okrajová podmínka nízké odrazivosti (low-reflecting boundary condition).

Výsledkem výpočtu byly průběhy šíření vln předsádkou pro případy úhlu dopadu ultrazvukového svazku hodnotách  $28^\circ$ ,  $54^\circ$  a  $70^\circ$ . V případě s úhlem  $70^\circ$  byly navíc zaznamenány horizontální a vertikální posuvy v měřeném bodě na povrchu ocelového segmentu s cílem detekovat povrchovou vlnu.

Byly vytvořeny dvě základní varianty plexipředsádky, které byly podrobeny MKP simulacím. Každá varianta byla simulována v několika modifikacích tvaru funkční části předsádky. Výsledný tvar předsádky je uveden na obrázku 20 a průběhy šíření vln v předsádce, pro výše zmíněné tři úhly, jsou uvedeny v přílohách.

V poslední kapitole je uveden postup a podmínky, při kterých byla výsledná předsádka testována a porovnávána s komerčně dostupnou předsádkou. Prezentované výsledky poukazují na poměrně dobrou účinnost funkční části plexipředsádky, která napomáhá eliminaci nežádoucích odrazů a tímto je aktivně tlumí. Z porovnání s komerčně dostupnou, optimalizovanou, předsádkou je evidentní minimální rozdíl mezi

tvarem echa. Nicméně, rozdíl mezi amplitudami ech činí přibližně 6 dB. Tento pokles amplitudy, v případě navrhované předsádky, je dán zejména jejími rozměry a tím i delší dráhou, kterou musí vlna plexisklem při přechodu do druhého prostředí a při svém návratu absolvovat.

Pro porovnání kvalit navržené plexipředsádky s konkurencí bylo užito předsádky s pevným úhlem dopadu. Zajímavější by však bylo porovnání s univerzální předsádkou, jako je například předsádka OLYMPUS ABWX-2001. Rozšířením této práce by mohla být předsádka s drážkovanou horní částí výběžku nebo výroba předsádky s ostrým přechodem výběžku do oblouku. Obě možnosti rozšíření této práce by mohly mít pozitivní vliv na kvalitu signálu.



## Seznam použité literatury

- [1] OBRAZ, Jaroslav. *Ultrazvuk v měřicí technice*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1976.
- [2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Ultrasonic Testing of Materials: at Level 2*. Vienna, Austria: IAEA, 1999.
- [3] HUDGELL, R. J. a B. S. GRAY. *The ultrasonic inspection of austenitic materials: State of the art report*. Paris, France: OECD Nuclear Energy Agency, 1985.
- [4] EDITORS a JOSÉ MERODIO AND GIUSEPPE SACCOMANDI. *Continuum Mechanics: v.2*. Oxford: EOLSS Publishers Co, 2010. ISBN 9781848268234.
- [5] SOUTHWEST RESEARCH INSTITUTE. *Nondestructive testing: A survey*. Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office, 1992.
- [6] SADD, M. H. *Wave Motion and Vibration in Continuous Media*. Kingston, Rhode Island: University of Rhode Island, 2009.
- [7] BRDIČKA, Miroslav, Ladislav SAMEK a Bruno SOPKO. *Mechanika kontinua*. Vyd. 2., opr. Praha: Academia, 2000. ISBN 8020007725.
- [8] *Special Application Transducers*. OLYMPUS [online]. [cit. 2017-03-30]. Dostupné z: [http://www.olympus-ims.com/cs/ultrasonic-transducers/special\\_applications/](http://www.olympus-ims.com/cs/ultrasonic-transducers/special_applications/)
- [9] PRYOR, Roger W. *Multiphysics modeling using COMSOL: a first principles approach*. Sudbury, Mass.: Jones and Bartlett Publishers, c2011. ISBN 0763779997.
- [10] ZHANG, Xinyue, Fadime BEKMAMBETOVA a Piero TRIVERIO. *Reduced order modeling in FDTD with provable stability beyond the CFL limit*. 2016 IEEE 25th Conference on Electrical Performance Of Electronic Packaging And Systems (EPEPS) [online]. IEEE, 2016, , 99-102 [cit. 2017-03-30]. DOI: 10.1109/EPEPS.2016.7835427. ISBN 978-1-5090-6110-5. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7835427/>
- [11] *Hann (Hanning) window*. MathWorks [online]. [cit. 2017-03-30]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/signal/ref/hann.html>

## Seznam příloh

Příloha A: Šíření vln v plexipředsádce, normálový úhel  $70^\circ$

Příloha B: Šíření vln v plexipředsádce, normálový úhel  $54^\circ$

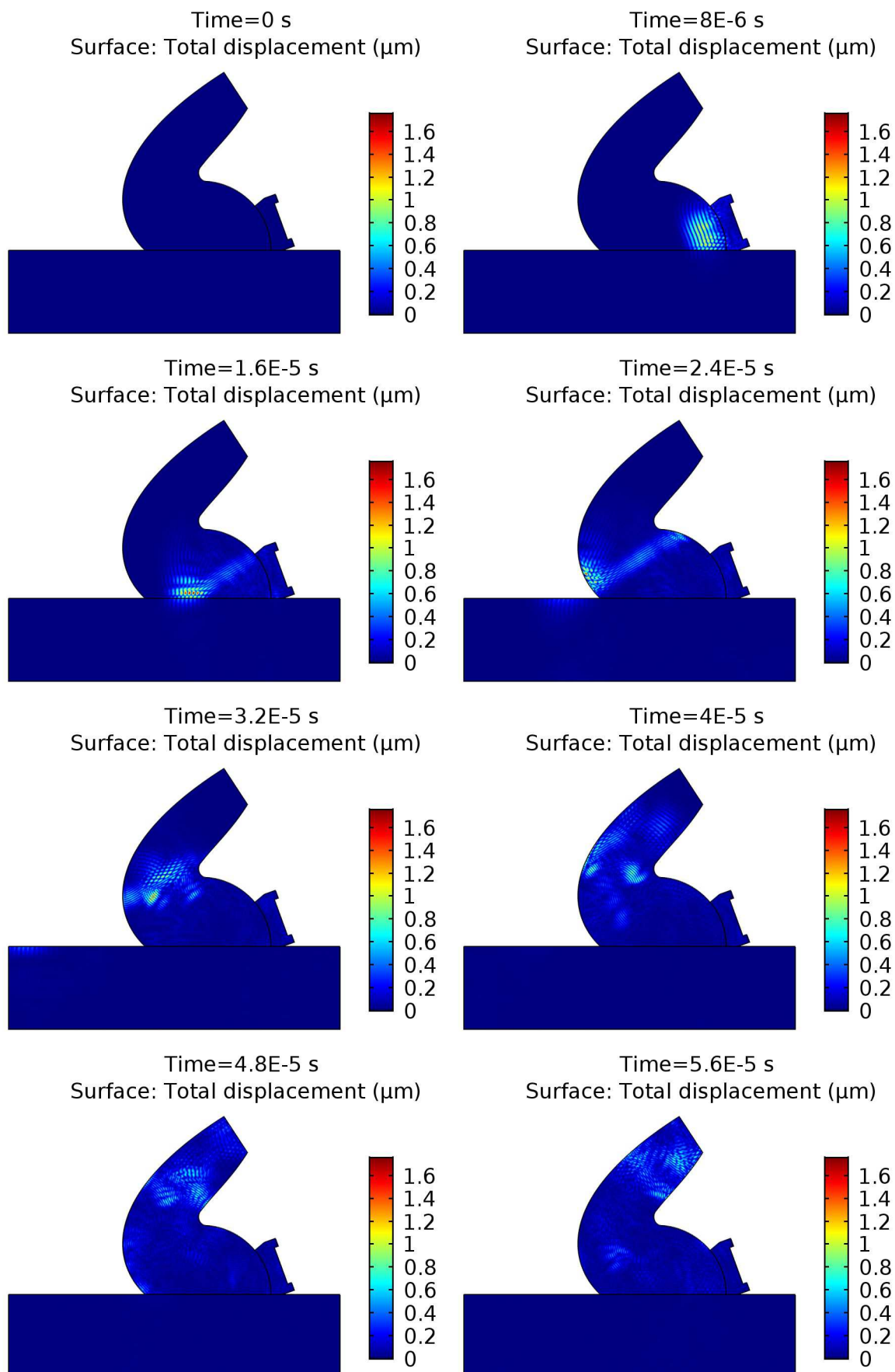
Příloha C: Šíření vln v plexipředsádce, normálový úhel  $28^\circ$

## **Poděkování**

Rád bych zde poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Michalu Šoferovi, Ph.D. za jeho cenné rady a čas, který mi věnoval.

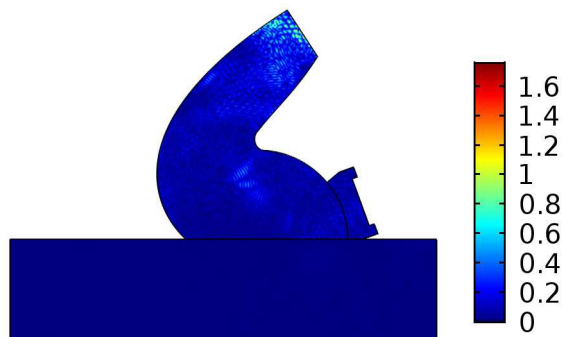
Dále bych rád poděkoval své rodině za podporu při studiu.

**Příloha A: Šíření vln v plexipředsádce, normálový**  
list 1/2      **úhel 70 °**

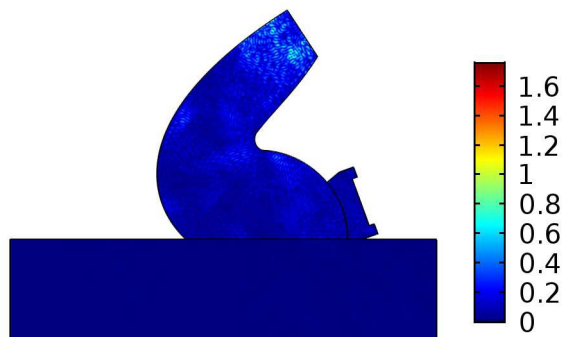


Příloha A: Šíření vln v plexipředsádce, normálový  
list 2/2 úhel 70 °

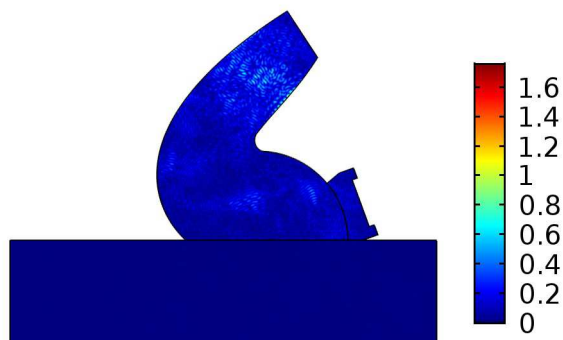
Time=6.4E-5 s  
Surface: Total displacement ( $\mu\text{m}$ )



Time=7.2E-5 s  
Surface: Total displacement ( $\mu\text{m}$ )



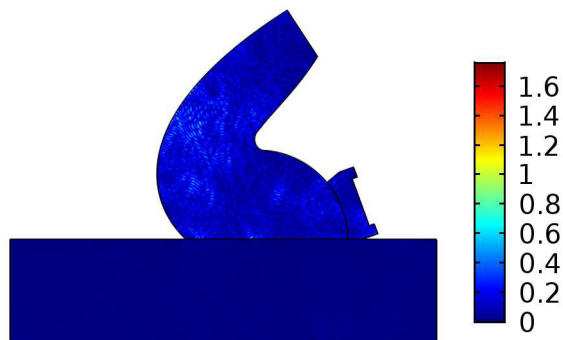
Time=8E-5 s  
Surface: Total displacement ( $\mu\text{m}$ )



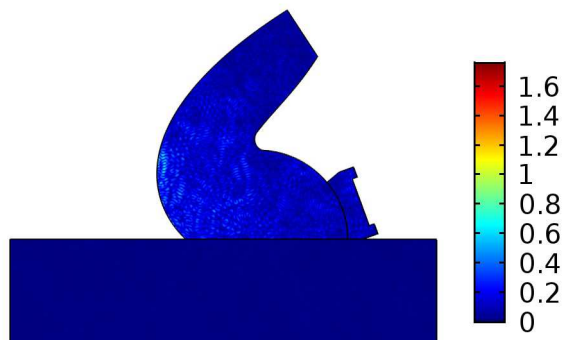
Time=8.8E-5 s  
Surface: Total displacement ( $\mu\text{m}$ )



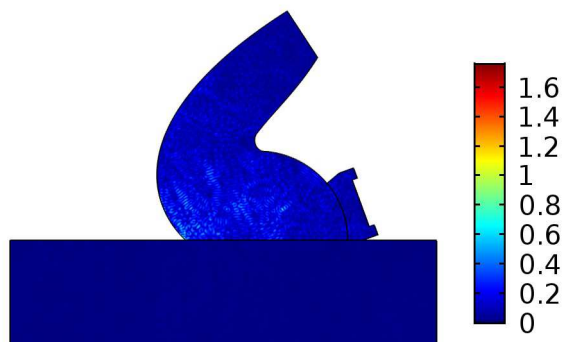
Time=9.6E-5 s  
Surface: Total displacement ( $\mu\text{m}$ )



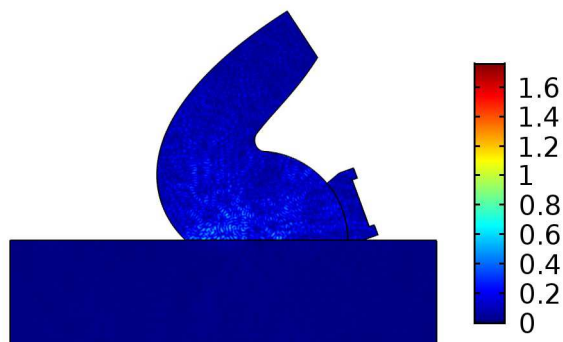
Time=1.04E-4 s  
Surface: Total displacement ( $\mu\text{m}$ )



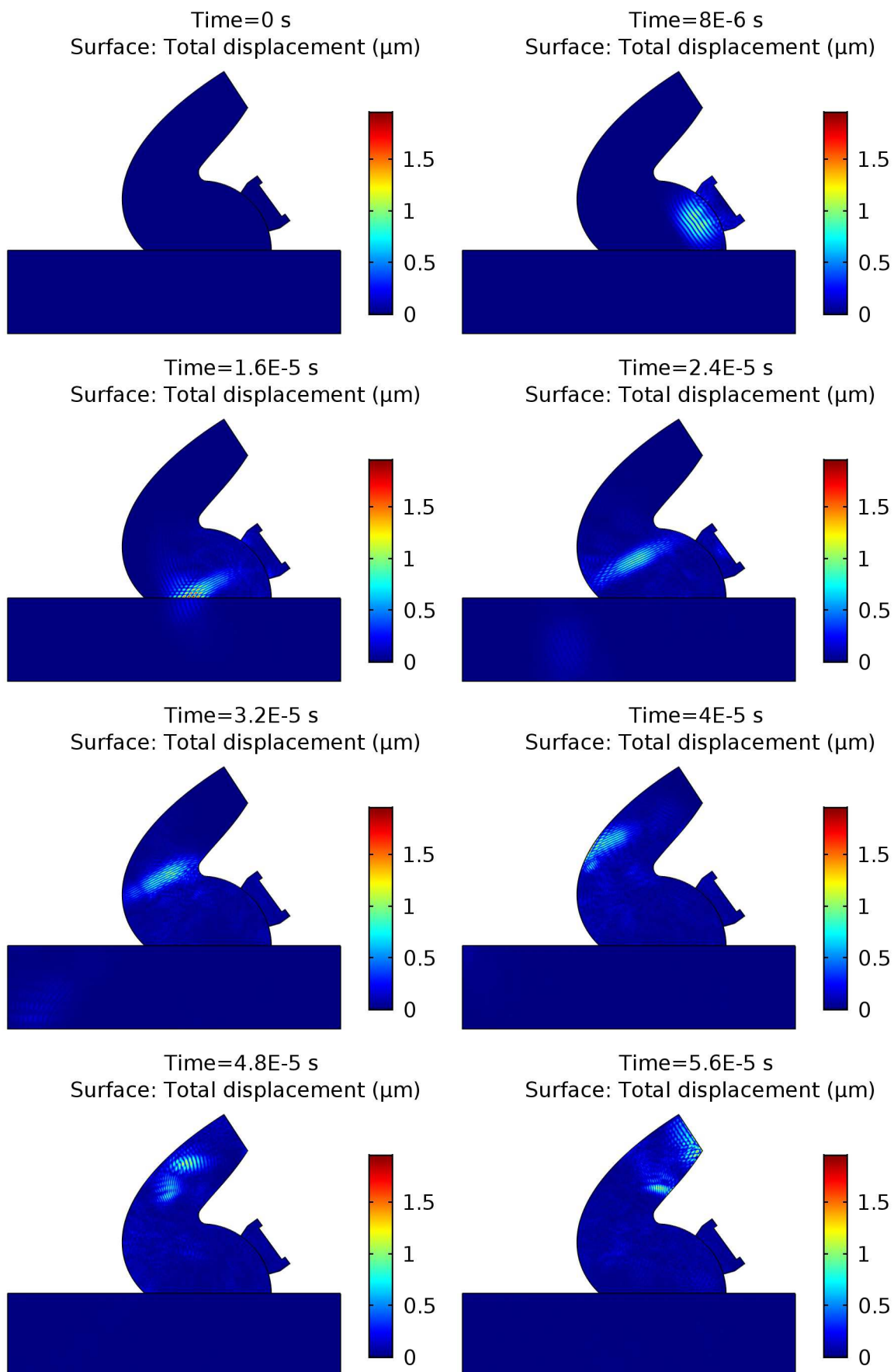
Time=1.12E-4 s  
Surface: Total displacement ( $\mu\text{m}$ )



Time=1.2E-4 s  
Surface: Total displacement ( $\mu\text{m}$ )

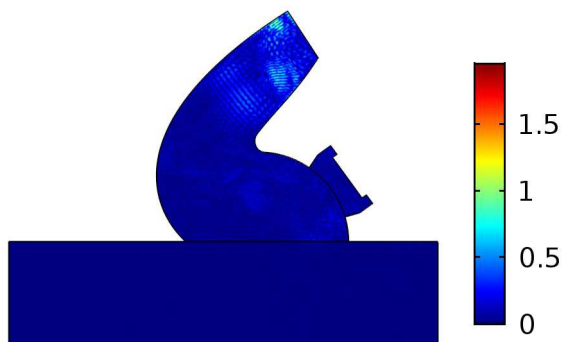


**Příloha B:**      **Šíření vln v plexipředsádce, normálový**  
list 1/2              **úhel 54 °**

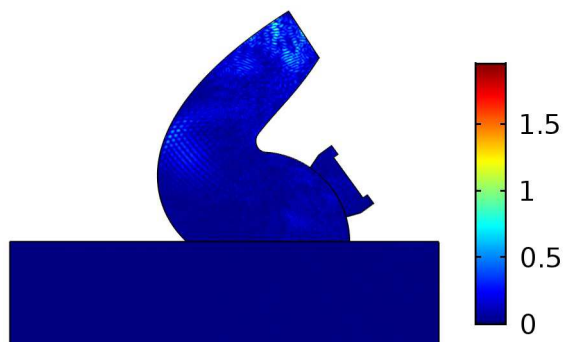


Příloha B: Šíření vln v plexipředsádce, normálový  
list 2/2 úhel  $54^\circ$

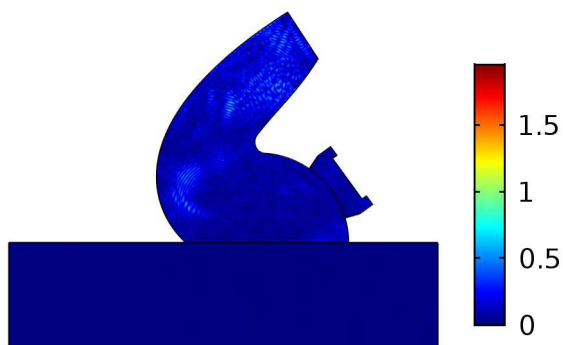
Time=6.4E-5 s  
Surface: Total displacement ( $\mu\text{m}$ )



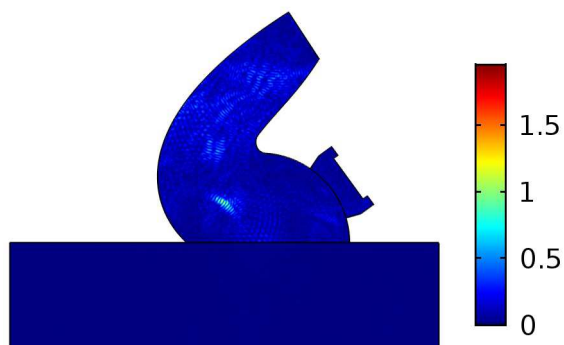
Time=7.2E-5 s  
Surface: Total displacement ( $\mu\text{m}$ )



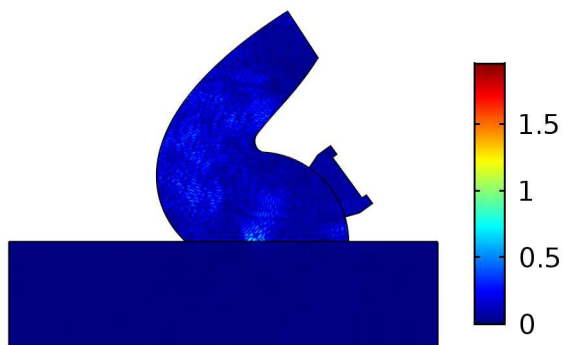
Time=8E-5 s  
Surface: Total displacement ( $\mu\text{m}$ )



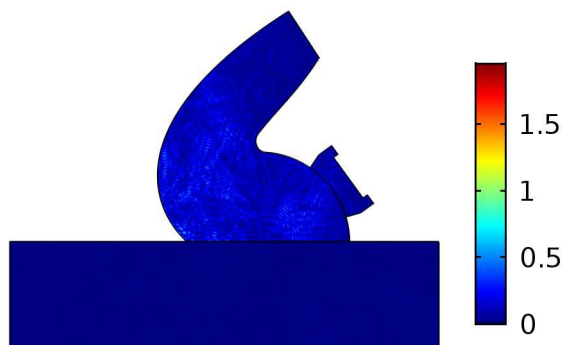
Time=8.8E-5 s  
Surface: Total displacement ( $\mu\text{m}$ )



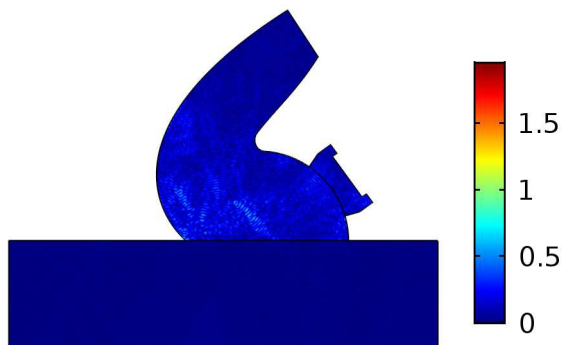
Time=9.6E-5 s  
Surface: Total displacement ( $\mu\text{m}$ )



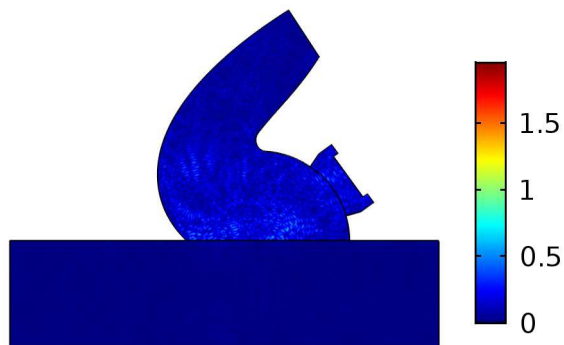
Time=1.04E-4 s  
Surface: Total displacement ( $\mu\text{m}$ )



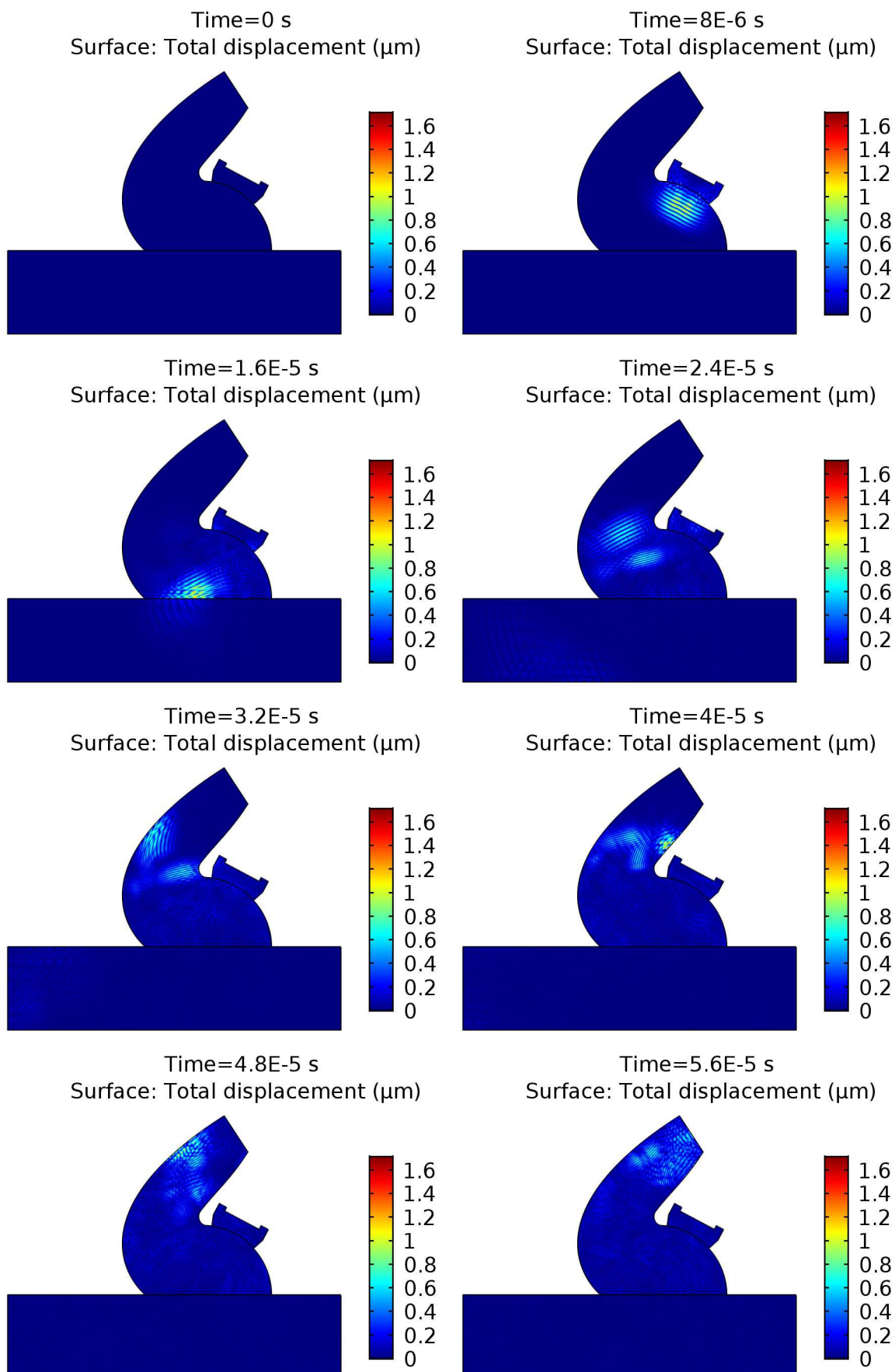
Time=1.12E-4 s  
Surface: Total displacement ( $\mu\text{m}$ )



Time=1.2E-4 s  
Surface: Total displacement ( $\mu\text{m}$ )



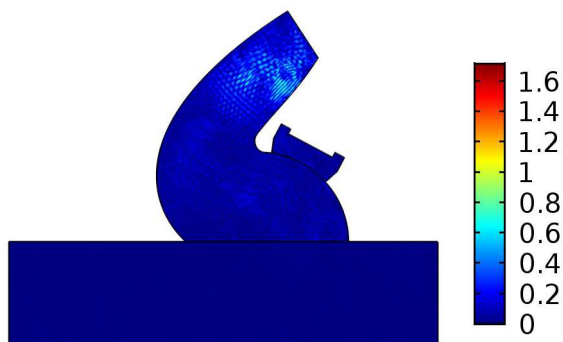
Příloha C: Šíření vln v plexipředsádce, normálový  
list 1/2 úhel 28 °



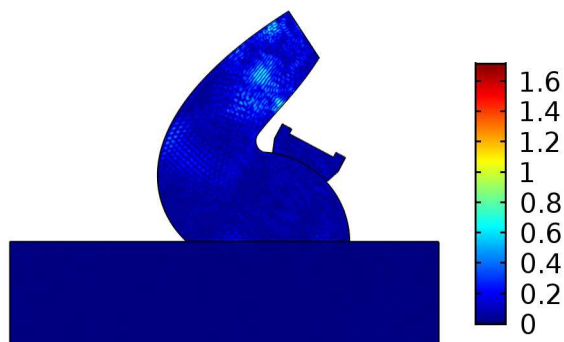


Příloha C: Šíření vln v plexipředsádce, normálový  
list 2/2 úhel 28 °

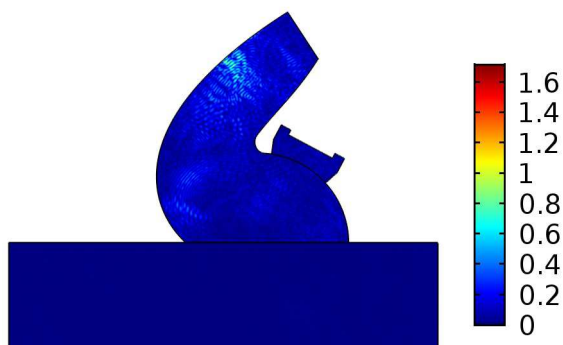
Time=6.4E-5 s  
Surface: Total displacement ( $\mu\text{m}$ )



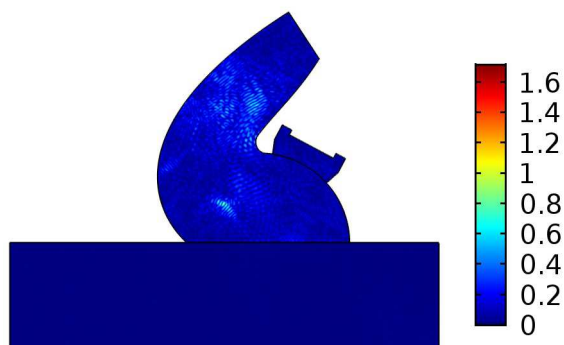
Time=7.2E-5 s  
Surface: Total displacement ( $\mu\text{m}$ )



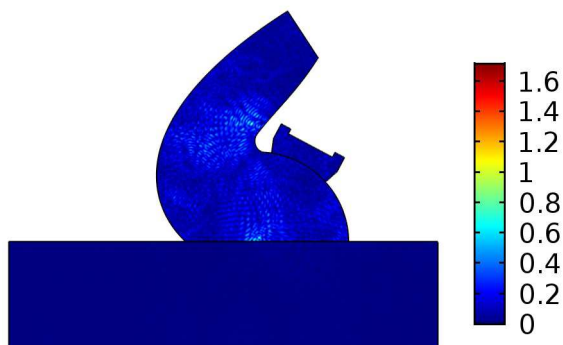
Time=8E-5 s  
Surface: Total displacement ( $\mu\text{m}$ )



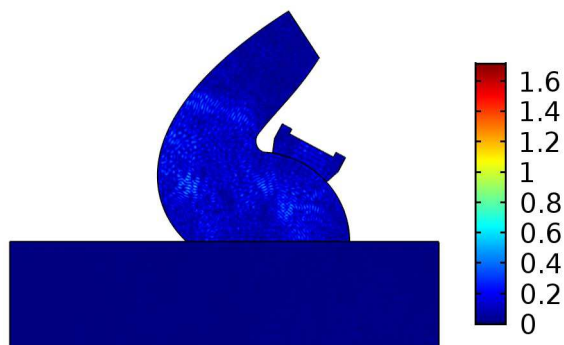
Time=8.8E-5 s  
Surface: Total displacement ( $\mu\text{m}$ )



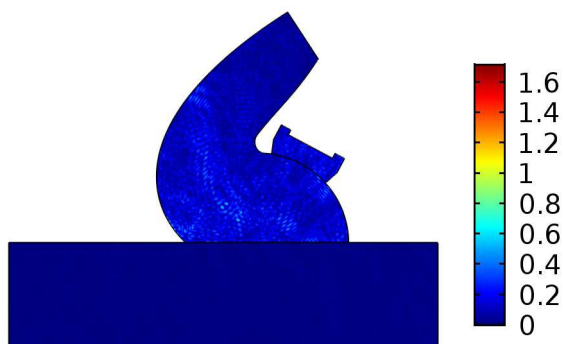
Time=9.6E-5 s  
Surface: Total displacement ( $\mu\text{m}$ )



Time=1.04E-4 s  
Surface: Total displacement ( $\mu\text{m}$ )



Time=1.12E-4 s  
Surface: Total displacement ( $\mu\text{m}$ )



Time=1.2E-4 s  
Surface: Total displacement ( $\mu\text{m}$ )

